

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ЭНЕРГЕТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

**МАТЕРИАЛЫ
XXV Международной научно-технической
конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых**

Гомель, 24–25 апреля 2025 года

**В двух частях
Часть 1**

Гомель 2025

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

И88

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, доц. *А. А. Бойко* (отв. редактор)

д-р физ.-мат. наук, проф. *О. Н. Шабловский*

д-р техн. наук, проф. *М. И. Михайлов*

д-р техн. наук, проф. *А. Б. Невзорова*

д-р техн. наук, проф. *А. В. Овсянник*

канд. техн. наук, доц. *А. А. Бабиц*

канд. техн. наук, доц. *Ю. Л. Бобарикин*

канд. техн. наук, доц. *Ж. В. Кадолич*

канд. техн. наук *Т. В. Алферова*

канд. техн. наук, доц. *Ю. В. Крышнев*

канд. техн. наук, доц. *В. В. Брель*

канд. техн. наук *К. С. Курочка*

канд. техн. наук, доц. *Т. А. Трохова*

канд. экон. наук, доц. *И. В. Ермонина*

канд. экон. наук, доц. *Л. Л. Соловьева*

канд. экон. наук, доц. *Е. П. Пономаренко*

канд. геогр. наук, доц. *Е. Н. Карчевская*

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

Подготовка и проведение конференции осуществлены на базе
Гомельского государственного технического
университета имени *П. О. Сухого*

Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики
И88 и управления : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2025 г. В 2 ч. Ч. 1 / 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*, 2025. – 261 с.

ISBN 978-985-535-621-0.

Содержатся материалы XXV Международной научно-технической конференции по следующим направлениям: машиностроение и нефтегазоразработка; материаловедение и технологии обработки материалов; энергетика; радиоэлектроника, автоматизация, телекоммуникации и связь; экономика, организация производства и управление; маркетинг и отраслевая экономика; информационные технологии и моделирование; физические и математические методы исследования сложных систем.

Для студентов, аспирантов и молодых ученых.

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

ISBN 978-985-535-621-0 (ч. 1)

ISBN 978-985-535-623-4

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

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Семченко А. В. Функциональные материалы для микроэлектроники и техники	8
Крышнеў Ю. В., Захаранка Л. А., Запольскі А. Я. Асаблівасці праектавання кантрольна-вымяральной дыягнастычнай прылады для падземных магістральных нафтаправодаў	10
Бочаров Н. В., Ткачев В. М. Современные направления развития добычи трудноизвлекаемых запасов нефти месторождений Республики Беларусь с применением цифровых технологий	14

Секция I. МАШИНОСТРОЕНИЕ И НЕФТЕГАЗОРАЗРАБОТКА

Майлат Я. А., Порошин В. Д. Оценка изменения фильтрационно-емкостных свойств пластовых пород призабойных зон подсолевой залежи Золотухинского месторождения в результате растворения катагенетического галита	20
Авласенко И. С., Порошин В. Д. Контроль давления при вскрытии интервалов разреза с аномально высоким пластовым давлением	23
Писарев В. Ю., Аткинговская Т. В. Тестирование водонефтяных эмульсий в качестве технологических жидкостей для глушения скважин	25
Клевжиц Д. А., Андреевец Ю. А. Применение КОМПАС-3D Анимация для анализа взаимного движения деталей при проектировании аксиально-поршневого насоса с наклонным блоком	27
Писарев В. Ю., Злотников И. И. Применение технологии микродугового оксидирования для повышения коррозионной стойкости изделий из алюминиевых сплавов	31
Невзоров М. В., Петришин Г. В. Функционализация металлических порошков для лазерной наплавки	34
Бугримов А. А., Абрамович О. К. Процесс адаптации гидродинамических моделей нефтяных месторождений	37
Янковец М. А., Гурбан О. К., Пинчук В. В. Формирование структурных решений гидроблоков управления приводов технологического оборудования при их проектировании	40
Клочко У. В., Абрамович О. К. Особенности создания цифровых геологических моделей пластов на месторождениях Припятского прогиба	43
Комарницкий А. А., Шепелева И. С., Войтехин О. Л., Мироненко К. В. Описание и сравнение видов многостадийного гидроразрыва пласта на примере скважин Барсуковского месторождения нефти	46
Янкович Д. М., Андреевец Ю. А., Стасенко Д. Л. Анализ схемотехнических решений автоматического переключения частоты вращения гидромоторов ходовой части комбайна	49
Прядко М. О., Андреевец Ю. А. Сравнительный анализ гидросистем ходовой части зерноуборочных комбайнов GS12A1 PRO и GS12A1	52
Лапотько В. В., Андреевец Ю. А., Пинчук В. В. Анализ систем копирования рельефа при работе жатки	55

**Секция II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

<i>Ходосовская О. Ю., Бобарикин Ю. Л.</i> Пути повышения прочности выпускаемого металлокорда	59
<i>Чубарев Д. С., Мартьянов Ю. В.</i> Влияние типа и размера сетки конечных элементов на точность расчетов при моделировании свивки металлокорда	62
<i>Чубарев Д. С., Мартьянов Ю. В.</i> Влияние остаточных напряжений на технологические свойства металлокорда	65
<i>Деревянко Д. В., Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В.</i> Влияние способа изгиба металлокорда на его технологические свойства	67
<i>Тамков А. Д., Швецов А. Н.</i> Исследование электроимпульсного нанесения порошкового композиционного покрытия	69
<i>Ваниев Э. Р., Джемилев Э. Ш., Бекиров Э. Л., Крыжановский А. В.</i> Влияние режимов резания на стойкость фрезы с использованием различных СОТС	72
<i>Тамков А. Д., Швецов А. Н.</i> Способ получения полосового антифрикционного металлофторопластового композиционного материала	75
<i>Селюков И. В., Бобрышева С. Н.</i> Микропастик: что это такое и как с ним бороться?	78
<i>Савицкий К. Ю., Гракович П. Н., Целуева С. Н.</i> Методы контроля и программные решения для оптимизации качества измельчения углеволокна	81
<i>Кашиперов А. А., Галушкин И. А., Жукова А. А., Кадолич Ж. В.</i> Биополимерный материал для эндопротезов суставов: особенности рецептуры и механизм изнашивания	85
<i>Гаврилин В. Г., Rogov С. В.</i> Исследование транспортирования порошка с помощью вибродозатора в зону электромагнитной наплавки	87
<i>Rogov С. В., Стасенко Д. Л.</i> Оценка эффективности применения азотированных и борированных порошков при магнитно-абразивной обработке	91
<i>Иванов А. И., Асташинский В. М.</i> Механические и трибологические свойства титана после электролитно-плазменной цементации	94
<i>Будник В. С., Тучковский А. К., Врублевский И. А.</i> Влияние модификации катионами моноэтаноламмония и этилендиаммония на структуру и светопоглощение металлорганических перовскитных пленок	97
<i>Савченко С. А., Чубарев Д. С., Астапенко И. В.</i> Исследование зон микроструктуры бунтового проката из подшипниковой стали	100
<i>Деревянко Д. В., Бобарикин Ю. Л.</i> Зависимость для напряжения волочения в деформирующей зоне волокна	103
<i>Сыч Д. А., Ефременко К. В., Ухарцева И. Ю., Бобрышева С. Н.</i> Пористые материалы как новое направление в материаловедении	105
<i>Панфилов В. Н., Акунец Е. Г., Царенко И. В., Акулова Е. М.</i> Влияние лазерной закалки на триботехнические характеристики стали 45	108
<i>Корнеевец Г. К., Вайнер Д. А., Карчевский Ф. А., Кривогуз Ю. М., Царенко И. В.</i> Перспективность применения стеклопластиков на основе полипропилена для деталей машиностроения	111
<i>Шкуратов М. В., Мельников В. Д., Кирьянов Р. О., Кривогуз М. Ю., Царенко И. В.</i> Исследование влияния функционализированных полиофинов на фазовую структуру композитов на основе смесей полимеров	114

<i>Савченко С. А., Мельников Н. Н., Астапенко И. В.</i> Методика расчета водяного охлаждения бунтового проката из стали ШХ15 для получения структуры мелкодисперсного перлита.....	117
--	-----

Секция III. ЭНЕРГЕТИКА

<i>Фролов А. С., Хилько И. А., Широглазова Н. В.</i> Газопоршневые установки: от устройства до экономической целесообразности	121
<i>Петров Е. Ю., Ходько Е. М.</i> Охрана, использование и развитие особо охраняемых территорий Беларуси.....	124
<i>Таран А. В., Горковец Д. И., Киселевич В. В.</i> Определение режимных параметров испарительной системы кондиционирования воздуха	126
<i>Алексеев А. С., Широглазова Н. В.</i> Применение турбодетандеров в системе тепловых электростанций.....	130
<i>Мастепанов Р. Э., Вальченко Н. А.</i> Способ повышения энергоэффективности паровых турбин типа ПТ	132
<i>Агунович К. А., Макеева Е. Н.</i> Фильтрующий модуль для очистки воды на основе торфа	135
<i>Шутов Д. Г., Овсянник А. В.</i> Повышение эффективности турбоустановок на органическом цикле Ренкина	138
<i>Колмачева П. С., Овсянник А. В.</i> Теплообмен при конденсации фреона R404a на охлаждаемых поверхностях	141
<i>Чупахин И. А., Гребенникова Н. М.</i> Универсальный метод беспроводной зарядки для электротранспорта	144
<i>Янчук В. В., Романюк В. Н.</i> Повышение эффективности работы паротурбинной ТЭЦ за счет утилизации сбросных тепловых потоков.....	148
<i>Бучков М. С., Селиверстов Г. И.</i> Электрические и режимные параметры трехкоаксиальных радиальных компактных воздушных линий электропередачи	150
<i>Лабушев П. Н., Капанский А. А.</i> Анализ электроэнергетических показателей режимов работы насосного оборудования водозабора «Ипать».....	154
<i>Павлов В. В., Веремеева Д. И., Капанский А. А.</i> Методика проведения однофакторного дисперсионного анализа для выявления групп потребителей частного жилого сектора	156
<i>Козлов И. А., Жуковец С. Г.</i> Использование электромобилей для выравнивания графиков нагрузки г. Гомеля	160
<i>Запутряев Ф. С., Грунтоич Н. В.</i> Исследование влияния структуры мощностей перетока в энергосистему на устойчивость системы электроснабжения с одним генератором	163
<i>Гончаров М. Г., Зализный Д. И.</i> Особенности расчета режимов трехфазной низковольтной электрической сети	165
<i>Харкевич А. А., Лычев П. В.</i> Оценка эффективности применения линий номинального напряжения 20 кВ	168
<i>Веремеева Д. И., Зализный Д. И.</i> Анализ пропускной способности электрической сети населенного пункта Чечерского района	171
<i>Веремеева Д. И., Пухальская О. Ю.</i> Исследование эффективности перехода населения Республики Беларусь на дифференцированные по временным периодам тарифы на электрическую энергию	173

<i>Авдейчик Е. В., Зализный Д. И.</i> Малогабаритный аппарат для точечной сварки....	175
<i>Ганущак Д. А., Алферова Т. В., Добродей А. О.</i> Способы повышения надежности работы устройств релейной защиты и автоматики, использующих оптоволоконные каналы связи	178
<i>Булыгин Ю. В., Алексеев П. Д., Любов В. К.</i> Энергетическое использование борщевика	180
<i>Манюкевич М. С., Жуковец С. Г., Алферова Т. В.</i> Реализация одностороннего определения места повреждения линий электропередач	183
<i>Михадык А. В., Лычев П. В.</i> Применение автокластерных сетей при проведении автоматизации в сетях 6–10 кВ.....	185
<i>Капуза Д. А., Широков О. Г.</i> Пусковые характеристики тока и напряжения при включении персонального компьютера в питающую сеть.....	188
<i>Шамберова Е. А., Макеева Е. Н.</i> Сравнительный анализ качества бутилированной воды на территории Республики Беларусь	191

Секция IV. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И СВЯЗЬ

<i>Кузнецова А. В., Перов И. Э., Фролова Т. А.</i> Медицинские датчики в умных очках для слабослышащих и глухих людей	195
<i>Евстигнеева Е. П., Любавина М. А., Фролова Т. А.</i> Выбор офтальмологической щелевой лампы	197
<i>Назарчук В. Е., Савельев В. А.</i> Инновационный учебно-исследовательский стенд	200
<i>Савельева А. В., Брель В. В.</i> Актуальные проблемы модернизации металлорежущих станков	202
<i>Ивкин С. С., Лебедев С. М., Веннер Л. В.</i> Повышение эффективности беспилотных летательных аппаратов на оптоволоконном кабеле	206
<i>Рабков А. Ю., Калютнич Г. И., Погуляев М. Н.</i> Микропроцессорная система управления лабораторным стендом с двигателями постоянного тока	208
<i>Белоусов А. А., Козлов А. В., Тиличенко М. П.</i> Частотный преобразователь трехфазного тока для электродвигателей	209
<i>Чжан Лифан, Савельев В. А.</i> Анализ требований к интеллектуальной системе мониторинга промышленного оборудования.....	212
<i>Цзя Шусян, Погуляев М. Н.</i> Сравнительный анализ современных нагрузочных шкафов дизельных генераторов.....	215
<i>Тэн Цинсюнь, Брель В. В.</i> Искусственный интеллект в промышленных установках.....	218
<i>Лашкевич Д. Д., Логвин В. В.</i> Старт-стопное управление шаговым двигателем	220
<i>Мурач А. С., Сахарук А. В., Запольский А. Е.</i> Разработка комплексной информационной системы для энергосбыта	221
<i>Плескач К. А., Дунько В. А., Запольский А. Е., Крышнев Ю. В., Сахарук А. В.</i> Применение CAN-шины и TCP-протокола для сбора данных с датчиков нижнего уровня и их последующей передачи на средний уровень системы управления SPD.....	223
<i>Дзмітрук С. А., Запольскі А. Я., Крышнеў С. Ю., Крышнеў Ю. В., Буракова М. У.</i> Асаблівасці распрацоўкі метаду кадавання інтанацыйных контураў у англійскай мове.....	226

Запольский А. Е., Крышнев Ю. В. Возможности совершенствования систем катодной защиты магистральных нефтепроводов	229
Михайлов В. А., Виноградов Э. М. Применение графического жидкокристаллического дисплея в микроконтроллерных измерительных приборах	231
Лупарев А. А., Карпов В. А., Крышнев Ю. В., Запольский А. Е. Разработка автономных датчиков технологических параметров с применением беспроводного протокола Zigbee	234
Лупарев А. А., Крышнев Ю. В., Кручонок В. Г., Запольский А. Е. Измерение основных характеристик разных типов полупроводниковых детекторов радиации	237
Проскуряков М. А., Федорович А. В., Крышнев Ю. В., Лымарь О. В., Запольский А. Е. Обработка сигналов с датчика нагрузки и акселерометра для построения динамограмм установок штанговых глубинных насосов	240
Змиевский В. В., Цыкунов Е. Д., Карпов В. А., Захаренко Л. А., Запольский А. Е. Металлодетектор для кормо- и зерноуборочной техники	243
Илларионов П. А., Ковалев А. В., Запольский А. Е. Оценка состояния насосного оборудования по давлению и расходу	246
Белко М. М., Сахарук А. В., Запольский А. Е. Разработка информационной системы для предприятия общественного питания с интегрированным модулем прогнозирования продаж	248
Каханчик Д. В., Запольский А. Е. Комплексная система контроля и управления для коммерческого автомобильного транспорта	250
Запольский А. Е., Кокоулина Е. С., Крышнев Ю. В., Захаренко Л. А., Сахарук А. В. Технические возможности реализации системы управления детектором спиновой физики для коллайдера NICA	253
Тур В. Д., Запольский А. Е., Крышнев Ю. В. Универсальная система управления освещением с дистанционным каналом связи	257
Киселев Б. И., Запольский А. Е., Сахарук А. В. Программное обеспечение для организации работы с нейронными сетями	259

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ТЕХНИКИ

А. В. Семченко

*Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины», Республика Беларусь*

Представлены результаты закономерностей получения функциональных материалов золь-гель методом, а также закономерности влияния состава и особенностей синтеза золь-гель методом тонкопленочных сегнетоэлектриков, мультиферроиков и прозрачных проводящих оксидов на их функциональные свойства для создания новых изделий микроэлектроники и техники.

Ключевые слова: золь-гель метод, функциональные материалы, сложнооксидные сегнетоэлектрики, ферромагнетики, полупроводники, структура, свойства, микроэлектроника, техника.

Целенаправленное получение золь-гель методом функциональных слоев с воспроизводимыми, заранее заданными свойствами является сложной многофакторной задачей, при решении которой нужно учитывать фундаментальные закономерности золь-гель процесса, особенности взаимодействия конкретных исходных компонентов, требования к конечным параметрам разрабатываемых структур. Получение функциональных слоев золь-гель методом подразумевает создание стабильных систем с заданной пространственной организацией, при которой достигаются требуемые свойства. Золь-гель метод часто применяется для синтеза оксидных соединений, в том числе многокомпонентных и содержащих различные активирующие добавки, так как такой подход имеет ряд существенных преимуществ. В частности, это возможность снизить температуру формирования конечного соединения за счет непосредственного взаимодействия растворенных солей металлов между собой с образованием гомогенного пленкообразующего раствора, в котором равномерно распределены ионы активатора, что позволяет предварительно сформировать материал с нужным фазовым и структурным составом. Необходимо учесть, что за счет механизма роста золь-гель слоев, близкого к эпитаксиальному, их структурные и, как следствие, функциональные свойства будут существенно зависеть не только от природы золя, но и от условий осаждения и подложки.

Золь-гель методом могут быть получены различные классы перспективных функциональных оксидных и сложнооксидных материалов, в том числе в виде тонких слоев. Так, сегнетоэлектрики со структурой слоистого перовскита, такие как танталат (танталат-ниобат) висмута-стронция $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ ($\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_9$), характеризуются высокой диэлектрической проницаемостью, высокими пьезоэлектрическими и пьезоэлектрическими коэффициентами, приемлемыми электрооптическими свойствами и надежным переключением поляризации, для применения в энергонезависимой сегнетоэлектрической памяти (NvFRAM).

Мультиферроики проявляют ферромагнитные и сегнетоэлектрические свойства одновременно, что открывает широкие возможности их практического использования в новых видах запоминающих устройств. Ферроики обладают рядом уникальных свойств, таких как усиление намагничивания и связи между ферромагнитными

и сегнетоэлектрическими параметрами вблизи границ фаз. Контролируемость функциональных параметров может быть достигнута, в частности, за счет использования золь-гель метода, обеспечивающего требуемые свойства путем изменения химического состава, структурных параметров и управления дефектностью и стехиометрией соединений.

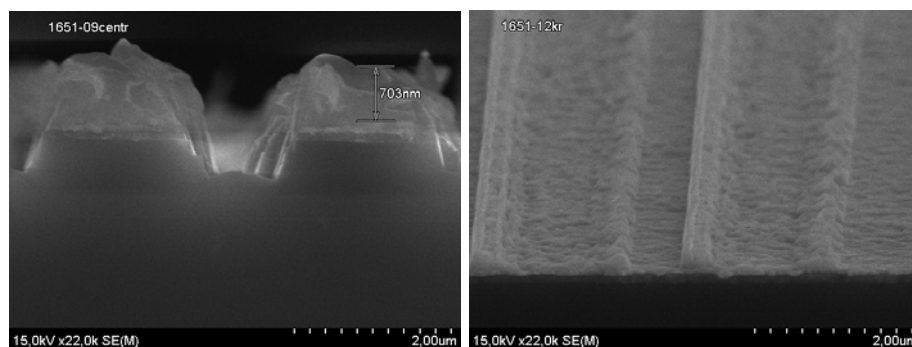


Рис. 1. РЭМ-скан SBT-пленки на монокристаллическом кремнии

BiFeO_3 является единственным однофазным мультиферроиком, который одновременно обладает сегнетоэлектрическими и ферромагнетическими свойствами при комнатной температуре из-за высоких температур фазового перехода (температура Кюри ~ 1083 K и температура Нееля ~ 657 K). Ранее порошки феррита висмута изготавливались преимущественно твердотельными и механохимическими методами, требующими высокотемпературных обработок, превышающих 800°C . Высокая температура при получении BFO является очень существенным недостатком, так как происходит испарение части висмута. Чтобы получить наноразмерный BFO без такого испарения, постепенно разрабатывались низкотемпературные методы синтеза, к которым относится золь-гель метод.

BiFeO_3 со структурой перовскита представляет интерес для последующего создания устройств записи информации высокой плотности (MRAM), магнитных сенсоров, электрически переключаемых постоянных магнитов и др. Известно, что BiFeO_3 (BFO) имеет ромбоэдрическую структуру перовскита. BFO характеризуется сегнетоэлектрическим упорядочением при высокой температуре Кюри (1103 K) и антиферромагнитным упорядочением G-типа с температурой магнитного перехода 643 K. В настоящее время рассматриваются различные варианты применения материалов на основе феррита висмута, основанные на их магнитоэлектрических и пьезоэлектрических свойствах. В свою очередь, легирование щелочноземельными элементами существенно снижает величину токов утечки, что расширяет возможности практического применения синтезированных материалов. Применение золь-гель метода, как следует из анализа литературы, позволяет существенно расширить диапазон концентраций легирующих добавок по сравнению с вакуумными методами нанесения покрытий, методами твердофазных реакций, применяемых для синтеза порошков аналогичного состава, а также обеспечивает однородность строения порошка либо пленки за счет формирования химических связей на стадии раствора (золя).

Тонкие пленки на основе оксида цинка широко применяются в фотовольтаике в солнечных элементах, фотодетекторах и других устройствах; в светодиодах (LED, OLED), в электрохромных устройствах плоских телевизионных панелей, а также

в качестве дополнительных слоев для пленочных фотоэлектрически активных гетеросистем, что позволит обеспечить стабильность их параметров. На их основе могут быть получены иерархические наноструктуры, нанотрубки, пластинчатые и конусовидные наноструктурированные массивы, интерес к которым в последние годы стремительно растет благодаря уникальным электронным, оптическим и оптоэлектронным свойствам этих объектов. В частности, наноструктуры ZnO используются в конструкциях газовых датчиков, суперконденсаторов, твердотельных, гибридных и органических солнечных элементов, светоизлучающих диодов, инструментов для биохимического зондирования, ультрафиолетовых лазеров, высокопроизводительных наносенсоров, пьезоэлектрических наногенераторов, коротковолновых светоиспускающих оптоэлектронных наноустройств.

АСАБЛІВАСЦІ ПРАЕКТАВАННЯ КАНТРОЛЬНА-ВЫМЯРАЛЬНАЙ ДЫЯГНАСТЫЧНАЙ ПРЫЛАДЫ ДЛЯ ПАДЗЕМНЫХ МАГІСТРАЛЬНЫХ НАФТАПРАВОДАЎ

Ю. В. Крышнеў, Л. А. Захаранка, А. Я. Запольскі

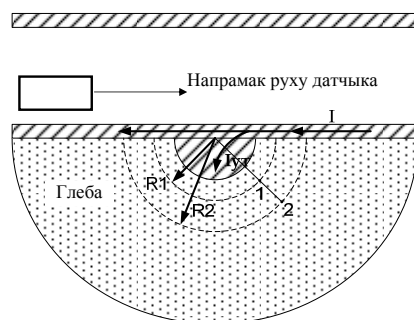
Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь

Разгледжаны інжынерна-тэхнічныя асаблівасці рэалізацыі ўнутрытрубнай кантрольна-вымяральнай дыягнастычнай прылады для кантролю цэласнасці ізаляцыйнага пакрыцця падземных магістральных нафтаправодаў.

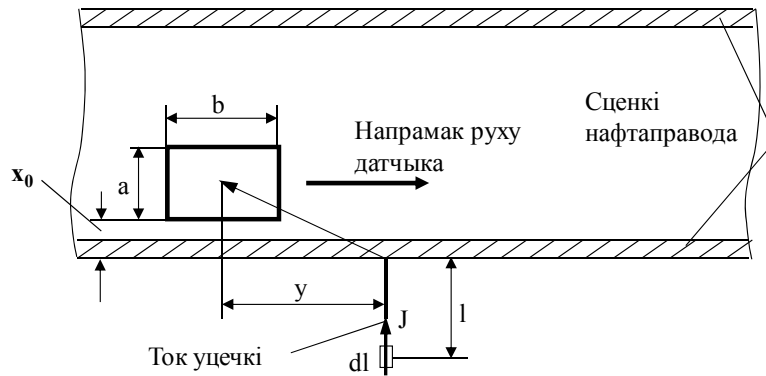
Ключавыя словы: кантроль якасці ізаляцыі знешняй паверхні нафтаправода, унутрытрубная кантрольна-вымяральная дыягнастычная прылада, ток уцечкі, магнітнае поле току ўцечкі, індукцыйны датчык, адыметрычны модуль, прафілемер.

Для папярэджання з'яўлення каразійных дэфектаў праз парушэнні ізаляцыі падземных нафтаправодаў быў распрацаваны метады бескантактавага (унутрытрубнага) кантролю якасці ізаляцыі трубаправода шляхам вымярэння магнітнага поля, створанага токам уцечкі, і ўзнікаючай неаднастайнасцю току трубы ў месцах пашкоджання ізаляцыі.

Метады прадугледжвае выкарыстанне пераменнага вымяральнага току, які генеруецца адмысловымі генератарамі. Парушэнне ізаляцыі размешчанага ў зямлі металічнага трубаправода прыводзіць да «расцяжання» току трубы ў зямлю. У выніку ток трубаправода робіцца неаднастайным. У адсутнасць неаднастайнасцы току магнітнае поле ўнутры трубаправода, роўнае нулю, неаднастайнасць току прыводзіць да з'яўлення магнітнага поля [1].



Мал. 1. Стварэнне магнітнага поля токам уцечкі



Мал. 2. Да разліку ЭРС, якая вымяраецца датчыкам току ўцечкі

Пры ўмове, што вымяральны ток мае гарманічны характар:

$$I(l) = I_0 e^{j\omega t},$$

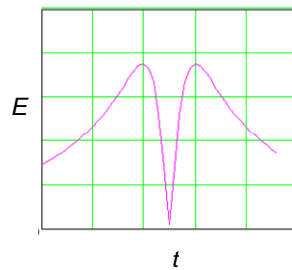
паводле закона Біа-Савара-Лапласа, індукцыя магнітнага поля ў месцы пашкоджання знешняга ізаляцыйнага пакрыцця ад элемента току ўцечкі даўжыні dl (мал. 2), вызначаецца аналітычна як

$$dB_z(x, y) = \frac{\mu_0 \cdot I(l) \cdot dl \cdot y}{4\pi \cdot \left[\sqrt{(x-l)^2 + y^2} \right]^3}.$$

Электрарухальная сіла (ЭРС), якая наводзіцца на індукцыйным датчыку:

$$\begin{aligned} E &= -NI_0 \frac{\partial}{\partial t} e^{j\omega t} \int_{-L}^0 \int_{x_0}^{x_0+a} \int_{y_m-\frac{b}{2}}^{y_m+\frac{b}{2}} dy dx dB_z = \\ &= \frac{N\mu_0 I_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} e^{j\omega t} \int_{-L}^0 dl \int_{x_0}^{x_0+a} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-l)^2 + \left(y_m + \frac{b}{2}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-l)^2 + \left(y_m - \frac{b}{2}\right)^2}} \right) dx = \\ &= \frac{N\mu_0 I_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} e^{j\omega t} \cdot \int_{-L}^0 \left[\ln \left| \frac{x_0+a-l + \sqrt{(x_0+a-l)^2 + \left(y_m + \frac{b}{2}\right)^2}}{x_0-l + \sqrt{(x_0-l)^2 + \left(y_m + \frac{b}{2}\right)^2}} \right| - \ln \left| \frac{x_0+a-l + \sqrt{(x_0+a-l)^2 + \left(y_m - \frac{b}{2}\right)^2}}{x_0-l + \sqrt{(x_0-l)^2 + \left(y_m - \frac{b}{2}\right)^2}} \right| \right] dl. \end{aligned}$$

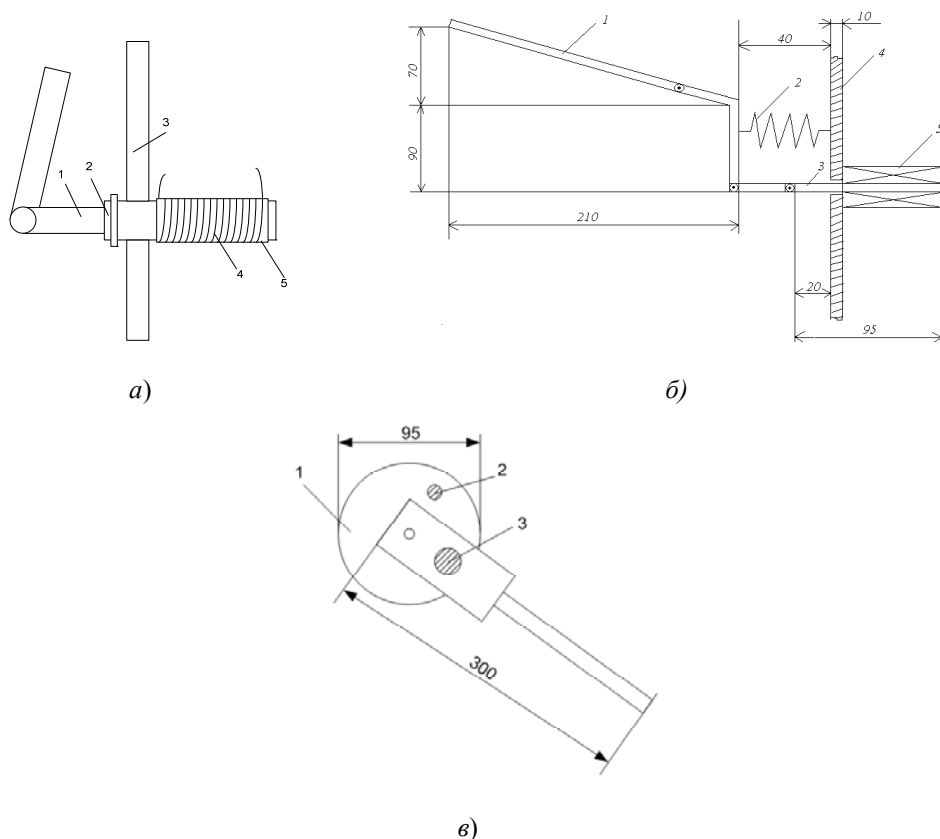
Залежнасць ЭРС ад часу на ўваходзе датчыка, усталяванага на ўнутрытрубнай кантрольна-вымяральнай дыягнастычнай прыладзе (КВДП), якая рухаецца за кошт энергіі транспартаванай нафты, паказана на мал. 3.



Мал. 3. Залежність сигналу на виході індукційного датчика від часу при русі внутрішньої контрольної діагностичної пристрої через місце порушення ізоляційного покриття нафтопроводу

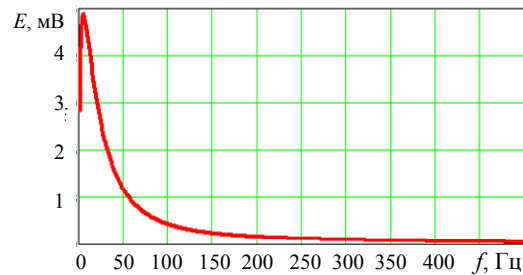
При цьому функцію ЕРС з максимумами при проходженні центральної частки датчика па-над місцем току ўцечки можна атрымаць за кошт выкарыстання двух шпуль індуктыўнасці з сустрэчным уключэннем (дыферэнцыяльная вымяральная схема ўключэння датчыкаў) [2].

Распрацаваныя канструкцыі датчыкаў току ўцечкі праз пашкоджанне ізоляцыйнага пакрыцця, а таксама датчыкаў унутранага рэльефу трубы (прафілемера) і пройдзенай адлегласці (адометра) паказаны на мал. 4.



Мал. 4. Канструкцыі датчыкаў КВДП:
а – датчык току ўцечкі: 1 – рухомы стрыжань; 2 – каркас з нефермагнітнага металу; 3 – корпус КВДП; 4 – вількі шпуль індуктыўнасці; 5 – дыэлектрычная праслойка; б – прафілемер: 1 – рычаг; 2 – спружына; 3 – стрыжань; 4 – корпус КВДП; 5 – шпуля індуктыўнасці; в – адомер: 1 – кола; 2 – магніт; 3 – шпуля індуктыўнасці

Выбор оптимальной частоты генератора вымьрального тока ажыццёўлены з комплексным улікам характарыстык частотных залежнасцяў: 1) каэфіцыента пражоджання сігнала праз сценку трубы; 2) велічыні магнітнай пранікальнасці канструкцыйнага матэрыялу (сталі); 3) амплітуды сігнала на выхадзе індукцыйнага датчыка; 4) хуткасці руху дыягнастычнай прылады [1–3]. Сумарны ўплыў характарыстык на велічыню ЭРС адлюстроўвае мал. 5.



Мал. 5. Залежнасць сігналу на выхадзе датчыка ад частаты генератора

Знешні выгляд КВДП з усімі датчыкамі (3 каналы датчыкаў току уцечкі, 3 каналы прафілемера, 2 каналы адометра) пасля мантажу на ўнутрытрубны транспартны аб'ект паказаны на мал. 6.



Мал. 6. Знешні выгляд КВДП

Літаратура

1. The monitoring and control system of the intrapipe sealer / Yu. Kryshneu, L. Zakharanka, E. Vinagradau [et al.] // ITELMS'2010. – Materials of 5th International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems June 3–4, 2010, Panevezys, Lithuania. – P. 64–70.
2. Метод диагностики мест повреждения трубопровода / Ю. В. Крышнев, Н. И. Вяхирев, Л. А. Захаренко [и др.] // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. В 3 т. Т. 3 / под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика. – Новополюк : ПГУ, 2009. – С. 89–93.

3. Даследаванне праходжання сігнала праз сценку нафтаправода для сістэмы кіравання ўнутрытрубным герметызатарам / М. І. Вяхіраў, Ю. В. Крышнёў, А. А. Наумук [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2015. – № 2 (61). – С. 80–87.

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев

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

Статья представляет результаты применения современных цифровых решений для повышения эффективности нефтедобычи на месторождениях Припятского прогиба. Разработана цифровая модель мониторинга строительства скважин, базирующаяся на автоматизированном определении операций и расчете ключевых показателей эффективности, что позволяет выявлять скрытое непроизводительное время и сокращать цикл строительства скважин. Интеграция методов искусственного интеллекта и машинного обучения обеспечивает точное прогнозирование аварийных ситуаций, повышая безопасность буровых работ. Также предложена методика создания цифрового двойника керна на основе КТ-изображений и испытаний неразрушающим методом индентирования, позволяющая моделировать напряженно-деформированное состояние образцов и оценивать их эффективные свойства. Полученные результаты подчеркивают значимость интеграции цифровых решений для устойчивой и безопасной эксплуатации нефтяных и газовых месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, где требуется максимальное увеличение рентабельности добычи.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ) нефти, цифровое бурение, цифровой керн, повышение эффективности добычи нефти.

Введение. В развитии нефтедобычи в пределах Припятского прогиба, как и в иных регионах мира, прослеживается эволюционный путь – от обнаружения месторождений и достижения пиковых уровней добычи до снижения отбора нефти на фоне роста обводненности продукции. Так, первый этап освоения этой территории, характеризующийся открытием и введением в эксплуатацию новых, наиболее крупных месторождений, пришелся на период 1965–1974 гг. В завершение этого этапа годовая добыча достигала 8,0 млн т, при этом 96 % производства обеспечивали три крупнейших месторождения – Речицкое, Осташковичское и Вишанское.

Второй этап, отмеченный стабильными показателями добычи, продолжался всего 1,5 года. Уже к 1976 г. по этим трем основным месторождениям были пройдены максимальные уровни добычи нефти, а новые месторождения, находившиеся на стадии пробной эксплуатации, не смогли компенсировать спад добычи.

Третий этап – период снижения добычи – охватывал 1976–1983 гг., когда годовая выработка нефти сократилась до 2,1 млн т. На сегодняшний день регион переживает заключительную стадию – неуклонное уменьшение уровней добычи, что в последние 20 лет стабилизировалось на отметке 1,6–1,8 млн т. При этом совершенствование систем разработки зрелых месторождений, бурение новых эксплуатационных скважин и внедрение современных технологий, таких как гидроразрыв пласта, разнообразные методы повышения нефтеотдачи пластов (ПНП), а также бурение горизонтальных и разветвленных скважин, позволили добиться данной стабильности.

Современная фаза разработки нефтяных месторождений Припятского прогиба сопровождается ростом негативных тенденций, связанных с целым рядом объективных и субъективных факторов. К ним относятся: увеличение обводненности добываемой продукции; старение и износ эксплуатационного фонда скважин; снижение объемов добычи; низкая интенсивность восполнения углеводородной ресурсной базы посредством геологоразведочных работ; тот факт, что запасы вновь открываемых месторождений в основном представляют собой трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ) нефти; значительное увеличение доли ТРИЗ за счет преждевременной выработки активных резервов на зрелых месторождениях и прироста их за счет гидрорегулирования разработки (рис. 1); концентрация значительных объемов ТРИЗ в нетрадиционных коллекторах, разработка которых традиционными технологиями оказывается нерентабельной [1, 2].

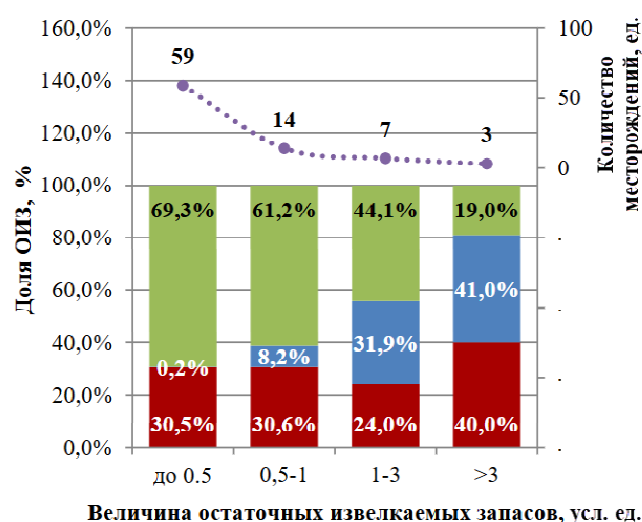


Рис. 1. Распределение остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ) нефти месторождений, числящихся на балансе РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» [3]

■ – трудноизвлекаемые ОИЗ (по ФЕС); ■ – трудноизвлекаемые ОИЗ (высокая выработка запасов и обводнение); ■ – активные ОИЗ;
 ... – количество месторождений

В белорусском регионе наблюдается тенденция к увеличению категории ТРИЗ, при этом применяемые традиционные технологии уже не способны обеспечить рост темпов их отбора и тем более улучшить коэффициент извлечения нефти (КИН). Для ряда категорий подобных запасов отсутствует экономически оправданная технология разработки. Эта объективная ситуация диктует необходимость создания, адаптации и внедрения комплекса усовершенствованных и новых технологических решений в области добычи ТРИЗ, в том числе с применением цифровых технологий.

Цель работы – показать накопленный авторами данной статьи опыт применения современных цифровых решений в области мониторинга эффективности строительства нефтяных скважин и исследования керна.

Современные цифровые решения в области строительства скважин. Цифровизация бурения включает интеграцию передовых технологий и аналитических инструментов, таких как искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение (МО) и большие данные в процесс бурения (рис. 2). Эти технологии позволяют проводить

детализированный анализ данных и управлять буровыми операциями в режиме реального времени. Использование передовых алгоритмов МО и ИИ позволяет прогнозировать различные параметры бурения и оптимизировать процесс на всех его этапах, значительно улучшая управление рисками и повышая безопасность работ [4]. Полученные данные позволяют оперативно реагировать на изменения условий бурения и вносить коррективы в процесс, что значительно повышает его эффективность. Кроме того, автоматизированный мониторинг улучшает качество управления буровыми процессами за счет точного учета временных и материальных ресурсов [5].

В данной работе предлагается цифровая модель оценки эффективности строительства скважин, основанная на автоматизированном определении операций в процессе бурения, их агрегации и обработки на специализированной цифровой платформе «Унофактор®» [6]. Данная цифровая модель построена на основе системы автоматизированного мониторинга эффективности строительства скважин, которая включает в себя расчет ключевых показателей эффективности (KPI) и скрытого непроизводительного времени, определение которого позволяет установить дополнительные временные ресурсы к снижению продолжительности цикла строительства скважин. Путем анализа статистических данных предложена методика подбора оптимальных режимных параметров бурения, при которых достигаются наибольшие значения механических скоростей для данных геологических условий без перегрузки и повышенного износа бурового оборудования, и определения оптимизированных норм времени на выполнение различных технологических операций в процессе бурения скважин.



Рис. 2. Пример создания среды доверенного взаимодействия всех участников бурового процесса на основе информации из различных источников с применением современных инструментов цифрового бурения

Важным аспектом применения элементов цифрового бурения является возможность применения элементов МО для прогнозирования и предупреждения возможных осложнений и аварий в процессе бурения нефтяных и газовых скважин, что поможет повысить безопасность ведения буровых работ и снизить возможные существенные денежные и временные затраты на ликвидацию последствий. В работах авторов данной статьи [5, 7] показан пример прогнозирования осложнений с применением средств МО и ИИ. Результатом постоянной актуализации разработанных решений с использованием предиктивной аналитики является методика прогнозирования аварийности

при бурении нефтегазовых скважин. Каждый анализируемый параметр ГТИ, так или иначе участвующий в обработке предполагаемой той или иной аварии или осложнения, прогнозируется отдельно от остальных. Имеющаяся обширная база обработанных цифровой платформой данных позволила создать одну модель для прогноза сразу восьми каротажных кривых. Эта особенность позволяет уйти от создания определенной модели под каждую аварийную ситуацию – поглощение, нефте-, газо-, водопроявление, подклинивания или прихват буровой колонны. В то же время это увеличило требовательность к качеству новых данных (отсутствие пропусков, аномальных значений и пр.), которые подаются на вход обученной модели. Полученные результаты спрогнозированных (или экстраполированных) значений выбранных параметров позволяют применить к ним специальные алгоритмы определения аварий. Этот подход представляет собой гибридный метод прогнозирования, заключающийся в экстраполяции параметров ГТИ с помощью модели глубокого обучения с последующей подачей результирующих значений на вход специально разработанных алгоритмов под каждый вид аварии или осложнения. Данное решение отличается от решений прочих конкурентов тем, что можно подстраивать его «на лету», без необходимости длительного по времени переобучения моделей на множестве скважинных данных.

Таким образом, принятие необходимых мер по предотвращению аварийных ситуаций возможно при достоверном прогнозировании их наступления на основе анализа результатов измерений параметров технологических процессов строительства скважин. Автоматизированная система должна выполнять программную обработку результатов измерений в реальном масштабе времени, прогнозирование возникновения возможных осложнений и выдачу предупреждающих сообщений. При этом в большинстве случаев возникновение осложнений при строительстве скважин определяется сложной совокупностью геолого-геофизических и технологических параметров и не может быть выявлено в результате визуальных наблюдений оператором.

Современные цифровые решения в области исследования керна. Единственным достоверным источником геологической информации о горных породах, залегающих на большой глубине, является керн – столбик горной породы, образующийся в процессе бурения скважины и выносимый на поверхность с целью его дальнейшего изучения. Ввиду большой стоимости отбора керна, деградации керна с течением времени, а также внесении деструктивных изменений в образец горной породы при исследовании ее механических свойств, становится актуальной разработка неразрушающих методов определения упругопрочностных характеристик горной породы с последующим анализ эффективных свойств с применением современных цифровых средств моделирования.

В данной работе представлены результаты исследования механических свойств горных пород неразрушающим методом – индентированием, а также представлены возможные аспекты практического применения полученных результатов в виде создания цифрового двойника образца горной породы.

Породы-коллекторы Припятского прогиба, к которому приурочены нефтяные месторождения Республики Беларусь, представляют собой преимущественно карбонатные коллекторы и в ряде случаев обладающие значительным объемом каверн и трещин. Это усложняет, а иногда и делает невозможным проведение лабораторных испытаний стандартными методиками. Авторами данной статьи предлагается новая концепция в цифровом исследовании керна – это создание виртуального (цифрового) двойника стандартного образца керна с целью проведения таких цифровых геомеханических исследований, как испытание на одноосное сжатие-растяжение, объемное сжатие, испытание на сжимаемость и др. Таким образом, цифровой керн –

это мультимасштабная (от метров до нанометров) компьютерная совокупность данных об образце горной породы, включающая объемную 3D-модель образца, построенную на основе изображений рентгеновской компьютерной томографии (КТ). Она содержит информацию о петрофизических и механических свойствах, а также информацию о минеральном составе породы [8].

При создании объекта «цифровой геомеханический керн» используются изображения КТ стандартного образца ($\varnothing 30 \times 60$ мм), что отличает предлагаемую методику от уже существующих, где сканируются микрочастицы размером менее 4 мм. Разработан метод гомогенизации основного объема породы, содержащего равномерно распределенную микропористость, сохраняя крупные макродефекты. Гомогенизация заключается в объединении пор, размер которых не превышает разрешения съемки КТ, в цифровую модель матричного материала. При этом все необходимые свойства данной матрицы определяются методом индентирования [9].

Результатом создания цифровой геомеханической модели керна (рис. 3) с интеграцией в нее результатов комплексного определения упругопрочностных свойств горных пород методом индентирования является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при различных механических испытаниях.

Полученные значения напряжений и деформация могут служить калибровочным инструментом для построения геомеханической модели залежи, а также позволяют получить напряжения инициации трещины при проведении ГРП, что позволит повысить эффективность подготовки и проведения данной операции.

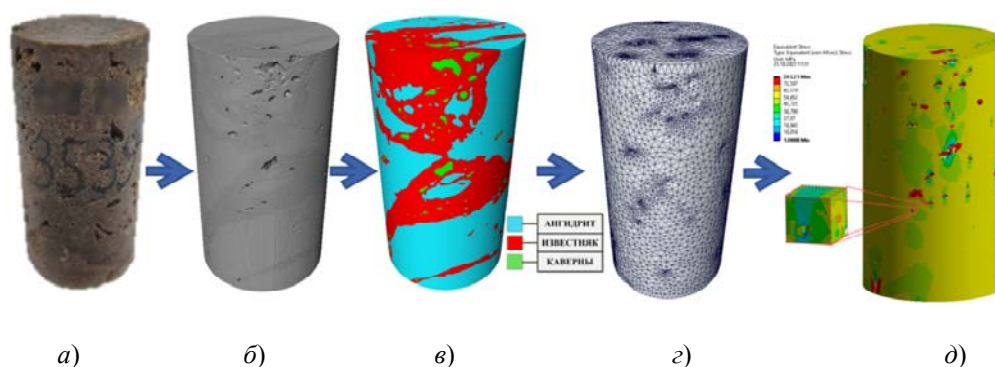


Рис. 3. Результат построения цифрового геомеханического керна:
 а – фото натурального образца; б – 3D-реконструкция томографии образца керна;
 в – сегментация КТ на три фазы; з – создание конечно-элементной модели;
 д – компьютерное моделирование НДС при одноосном сжатии

Отдельным аспектом применения цифровой модели керна необходимо отметить возможность оценки сжимаемости сильно кавернозных карбонатных образцов горной породы, в которых заключена основная доля упругих сил при разработке залежи и основной объем запасов нефти в данном типе коллектора. Провести оценку сжимаемости таких образцов лабораторным путем не представляется возможным, из-за разрыва обжимной PVT-пленки в камере Хоека и прорыва флюида, создающего обжимное давление [10].

Заключение. Внедрение цифровых технологий в нефтедобычу не только оптимизирует технологические процессы, но и существенно повышает эффективность эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. Реализация предложенной цифровой автоматизированной системы мониторинга строительства скважин и технологии цифрового геомеханического керна позволяет сократить временные и финансо-

вые затраты при проведении работ. Гибридный метод прогнозирования, основанный на моделях глубокого обучения, демонстрирует высокую точность и гибкость, позволяя адаптировать систему «на лету» без длительного переобучения. Полученные результаты открывают перспективу для масштабирования данных решений в рамках управления нефтегазовыми проектами, что способствует устойчивому развитию отрасли даже при усложнении добычных процессов. Особое внимание уделено цифровым решениям для повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов, доля которых растет в условиях старения фонда эксплуатационных скважин и ограниченности традиционных методик. Таким образом, цифровизация становится ключевым фактором модернизации и повышения эффективности эксплуатации месторождений, включая сложные для извлечения запасы нефти.

Литература

1. Повжик, П. П. Системно-адресный подход к разработке, планированию и внедрению технологий активизации добычи трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов нефти на месторождениях Припятского прогиба / П. П. Повжик, Н. А. Демяненко. – Минск : Четыре четверти, 2023. – 296 с.
2. Системный подход к разработке трудноизвлекаемых запасов в РУП «ПО «Белоруснефть» на основе применения адресных технологий воздействия / П. П. Повжик, И. В. Жук, Д. В. Сердюков [и др.] // Недропользование XXI век. – 2018. – № 4. – С. 148–159.
3. Повжик, П. П. Научно-методическое обоснование технологий разработки трудноизвлекаемых запасов нефти Припятского прогиба : дис. ... д-ра техн. наук : 2.8.4 / Повжик П. П. – Пермь, 2024. – 334 л.
4. Bost, S. Machine Learning for Enhanced Production Optimisation and Management / S. Bost // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2024. – P. 1–13. – DOI 10.2118/221205-MS
5. Серебrenников, А. В. О некоторых путях повышения эффективности бурения скважин (на примере нефтяных месторождений Республики Беларусь) / А. В. Серебrenников, Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 105–118. – DOI 10.62595/1819-5245-2024-4-105-118
6. Мельников И. Г. Нейросетевые платформенные решения для снижения аварийности процесса строительства нефтяных и газовых скважин / И. Г. Мельников, О. В. Захаров, С. О. Косенков // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 10. – С. 71–75. – DOI 10.24887/0028-2448-2020-10-71-75
7. Захаров, О. В. Использование предиктивной аналитики и машинного обучения для прогноза аварий в процессе строительства нефтяных и газовых скважин / О. В. Захаров, И. В. Захаров, Н. В. Бочаров // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 163–167.
8. Цифровая интерпретация геомеханической модели керна / Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев, И. Н. Степанкин, Р. Е. Гутман // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 27–28 окт. 2022 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, 2022. – С. 206–209.
9. Бочаров, Н. В. Применение метода индентирования для оценки изменчивости модуля Юнга горных пород изучаемого геологического разреза / Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 156–160.
10. Бочаров, Н. В. Геомеханические аспекты цифрового керна / Н. В. Бочаров // Академический форум молодых ученых стран Большой Евразии «Континент науки» : сб. тез. докл., Москва, 1–4 нояб. 2023 г. – М. : Центр науч.-техн. решений, 2023. – С. 189–191.

СЕКЦИЯ I МАШИНОСТРОЕНИЕ И НЕФТЕГАЗОРАЗРАБОТКА

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТОВЫХ ПОРОД ПРИЗАБОЙНЫХ ЗОН ПОДСОЛЕВОЙ ЗАЛЕЖИ ЗОЛОТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАСТВОРЕНИЯ КАТАГЕНЕТИЧЕСКОГО ГАЛИТА

Я. А. Майлат

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,
г. Гомель*

Научный руководитель В. Д. Порошин

Рассмотрены причины и особенности изменения фильтрационно-емкостных свойств засоленных продуктивных пород в процессе эксплуатации добывающих скважин нефтяных месторождений Припятского прогиба, показаны результаты расчета изменений фильтрационных свойств горных пород на гидродинамической модели подсолевой залежи Золотухинского месторождения, выделены перспективные направления для исследования и дальнейшего повышения качества моделирования засоленных коллекторов.

Ключевые слова: катагенетический галит, призабойная зона пласта, гидродинамическая модель, рассолонение, Припятский прогиб.

Нефтяные месторождения Республики Беларусь залегают в засоленных коллекторах. Способность галита растворяться при взаимодействии с закачиваемыми для поддержания пластового давления (ППД) водами приводит к изменению свойств пород в процессе разработки нефтяных залежей, что сильно отражается на показателях работы скважин. При этом наряду с галитом в порах, трещинах и кавернах пород-коллекторов также присутствуют доломит, ангидрит и кальцит. Однако эти минералы характеризуются низкой растворимостью в пресной воде, поэтому их наличие практически не влияет на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) пород при организации системы ППД [1]. Учет процесса растворения галита в пласте необходим для объективной оценки показателей работы скважин и планирования геолого-технических мероприятий. Поэтому основной задачей работы является оценка степени изменения характеристик продуктивных пород в призабойных зонах скважин, в которых при разработке залежей нефти происходит процесс растворения катагенетического галита, при гидродинамическом моделировании.

Для подсолевых, межсолевых и внутрисолевых отложений Припятского прогиба характерно присутствие галита в поровом пространстве (рис. 1). Заполнение пор и вторичных пустот солью резко снижает ФЕС пород на начальных стадиях разработки нефтяных месторождений [2].

При взаимодействии с закачиваемыми в нефтяные залежи водами фильтрационно-емкостные и фильтрационные свойства продуктивных пород претерпевают существенные изменения за счет растворения вторичного галита. Это свидетельствует о необходимости изучения данного процесса и учета особенностей его проявления при проведении поисково-разведочных работ, подсчете запасов нефти, анализе, контроле, моделировании и регулировании разработки нефтяных залежей.

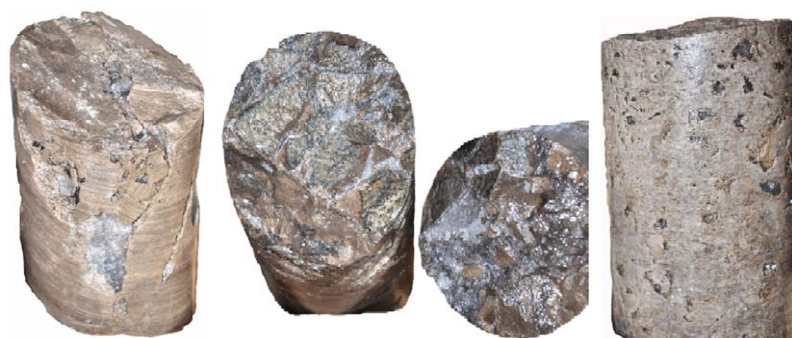


Рис. 1. Фотографии образцов керна скважины № 281 Осташковичского месторождения, трещины и каверны которого заполнены галитом

Специалистами БелНИПИнефть и ГГТУ им. П. О. Сухого разрабатывались различные методы оценки масштабов рассолонения продуктивных пород нефтяных месторождений по промысловым гидрохимическим данным, построены карты избыточного содержания хлористого натрия в попутно добываемых водах и объемов вынесенного галита [3]. Одним из методов оценки влияния процесса рассолонения на разработку нефтяных месторождений является построение численных гидродинамических моделей.

По результатам исследований засоления подсолевой залежи Золотухинского месторождения [4] было установлено, что химический состав попутных вод добывающих скважин формировался не только за счет смешения закачиваемых и пластовых вод, но и за счет растворения катагенетических галитовых выполнений трещин, пор и каверн, что увеличивает эффективную пористость и проницаемость пласта-коллектора. Показано [5], что попытки воспроизведения истории разработки на модели классическими методами адаптации не закончились успехом. В работе [6] рассолонение коллектора моделировалось путем многократного итеративного увеличения проницаемости каналов фильтрации между добывающими и нагнетательными скважинами. Однако использование данного метода существенно утяжеляет итоговую гидродинамическую модель, замедляя итоговое время расчета, и затрудняет проведение прогнозных расчетов ГТМ на ней. В данной реализации воспроизведение исторических показателей было достигнуто путем подбора объема законтурной области и исходного куба проницаемости, достаточного для обеспечения текущей энергетики залежи. Процесс рассолонения был воспроизведен путем увеличения проводимости межскважинных участков исходя из фактического темпа обводнения скважин.

Вследствие растворения галита в поровом пространстве изменяется также и проницаемость призабойных зон скважин и, как следствие, увеличивается их коэффициент продуктивности. По результатам адаптации гидродинамической модели для скважин семилукско-саргаевской залежи с исходной проницаемостью 20–70 мД для направления потоков воды и имитации рассолонения проводимость в межскважинном пространстве увеличивалась до 10 раз, в приразломных зонах – до 100 раз. Коэффициенты продуктивности скважин после прихода воды к забою при этом увеличились до 10 раз. С помощью учета процесса рассолонения удалось добиться необходимых показателей сходимости при настройке модели. Карта изменения проводимости процесса рассолонения представлена на рис. 2. Итоговые результаты адаптации гидродинамической модели подсолевой (vr-sr) залежи Золотухинского месторождения показаны на рис. 3.

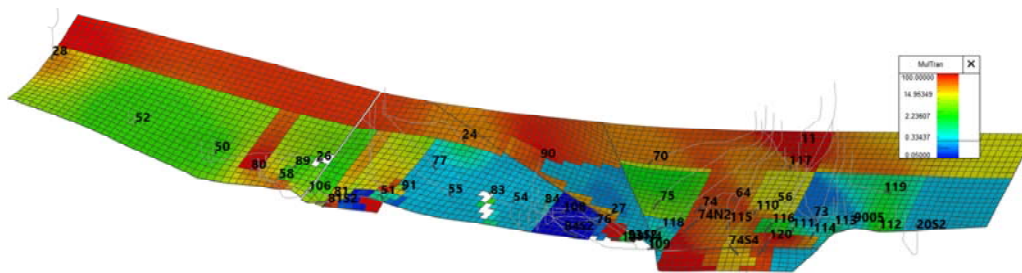


Рис. 2. Изменение проводимости при моделировании процесса рассолонения для семилукского горизонта подсолевой залежи Золотухинского месторождения на последнем расчетном шаге (03.2025 г.)

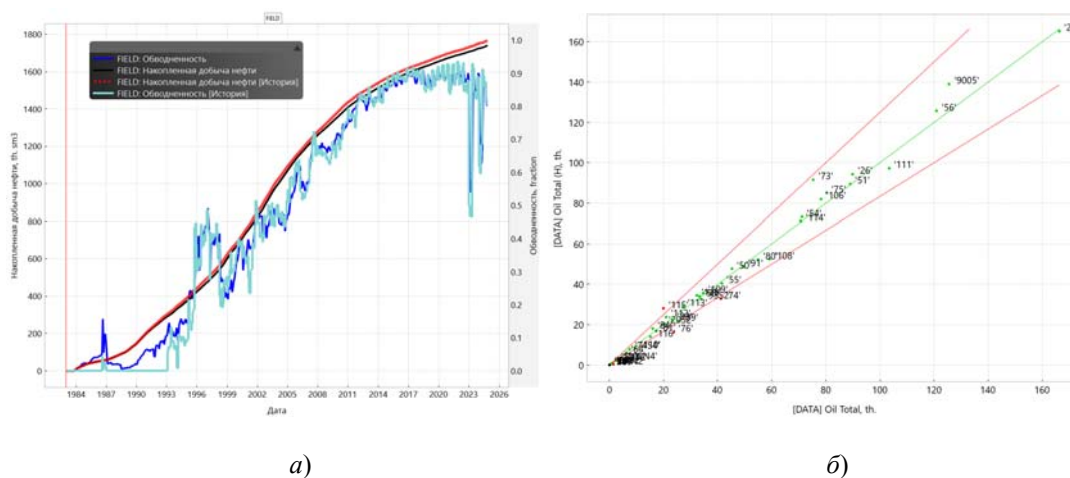


Рис. 3. Результаты адаптации гидродинамической модели подсолевой (vt-sr) залежи Золотухинского месторождения:
а – график сравнения накопленной добычи нефти и обводненности между историческими и модельными значениями по залежи; б – сравнение модельной (ось X) и исторической (ось Y) накопленной добычи нефти (кросс-плот) по скважинам

Таким образом, в качестве перспективных направлений для дальнейшего повышения качества моделирования выделяются задание начального распределения пластовой соли в пласте в явном виде для моделирования процесса вымывания галита пресной или слабоминерализованной водой, расчет эффективности геологических мероприятий, направленных на изменение фильтрационных потоков, а также учет гидрохимических исследований по оценке рассолонения коллекторов при построении гидродинамической модели.

Литература

1. К вопросу о влиянии галитовой минерализации на особенности разработки залежей нефти в низкопроницаемых породах-коллекторах Припятского прогиба. / В. Г. Жогло, А. А. Махнач, Я. Г. Грибик [и др.] // Природные ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 14–21.
2. К вопросу изучения засоленных коллекторов Припятского прогиба геофизическими методами / В. Д. Порошин, И. В. Качура, С. В. Козырева [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2020. – № 1 (80). – С. 81–93.
3. Научно-методическое сопровождение гидрохимического мониторинга разработки Золотухинского месторождения нефти : отчет о НИР (заключ.) 520-20 / Гомел. гос техн ун-т им. П. О. Сухого ; рук. В. Д. Порошин. – Гомель, 2020. – 239 с.

4. Порошин, В. Д. Методы обработки и интерпретации гидрохимических данных при контроле разработки нефтяных месторождений. / В. Д. Порошин, В. В. Муляк – М. : Недра, 2004. – 220 с.
5. Основные направления изучения засоленных коллекторов нефтяных месторождений Республики Беларусь / В. Д. Порошин, А. В. Халецкий, С. И. Гримус [и др.] // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2018. – С. 290–292.
6. Жогло, В. Г. Геолого-гидродинамические условия разработки залежей нефти в засоленных карбонатных коллекторах (на примере Золотухинского и Осташковичского месторождений Припятского прогиба) : монография / В. Г. Жогло, С. И. Гримус. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 170 с.

КОНТРОЛЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВСКРЫТИИ ИНТЕРВАЛОВ РАЗРЕЗА С АНОМАЛЬНО ВЫСОКИМ ПЛАСТОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ

И. С. Авласенко

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

Научный руководитель В. Д. Порошин

В подсолевом и межсолевом нефтегазоносных комплексах ряда районов Припятского прогиба встречены пласты с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). Рассмотрен один из наиболее эффективных методов проводки глубоких скважин в зонах распространения АВПД, основанный на технологии бурения с управляемым давлением. Представлено обсуждение вопроса научного обоснования выбора технологии строительства и конструкции скважины в условиях узкого или неизвестного окна бурения для конкретных геолого-технических условий одного из участков рассматриваемого региона.

Ключевые слова: скважина, промысловая жидкость, окно бурения, регулирование давления, бурение, плотность, АВПД, эквивалентная циркуляционная плотность.

При поисково-разведочном бурении в подсолевом и межсолевом нефтегазоносных комплексах целого ряда зон и локальных объектов Припятского прогиба встречены аномально высокие пластовые давления (АВПД) [1]. Так, при доразведке подсолевых залежей восточного блока Гарцевского нефтяного месторождения в межсолевых отложениях (туровские слои елецкого горизонта) были вскрыты породы-коллекторы с АВПД с весьма высокими значениями коэффициента аномальности. Условия бурения на скважинах с АВПД характеризуются узким допустимым диапазоном статической и циркуляционной плотности бурового раствора («окном бурения»). По этой причине вскрытие нефтегазоносного резервуара с АВПД привело к значительному непроизводительному времени строительства скважины. Были понесены дополнительные затраты при борьбе с нефтегазоводопроявлением (НГВП) и поглощениями.

В мировой практике одной из наиболее эффективных технологий в схожих условиях узкого окна бурения является бурение с регулируемым давлением (БРД) [2]. Данная технология является дорогостоящей и ее применение экономически оправдано не на каждой скважине.

Применение технологии БРД снижает затраты на химические реагенты и буровой раствор, поглощаемые при превышении давления гидроразрыва. Проявления газонефтяной смеси из пласта оперативно обнаруживаются, а их объем значительно уменьшается за счет создания противодействия [3].

Технология БРД, применяемая в системе «скважина – пласт», не ухудшает фильтрационные свойства пласта и снижает вероятность осложнений и аварий до минимума. Данная технология позволяет достичь значительного снижения воздействия промывочной жидкости на продуктивный пласт (снижение скин-эффекта в призабойной зоне скважины), дает возможность бурения трещиноватых коллекторов без необходимости кольматирования продуктивных зон, что способствует увеличению коэффициента извлечения нефти и сроков продуктивности скважин [4].

Комплексная оценка технологических преимуществ системы БРД рассматривается на примере гидравлического моделирования во время основных операций при бурении межсоловых отложений в скважине 6 Гарцевская по проектной и предлагаемой конструкции.

Основными элементами системы БРД являются роторный устьевой герметизатор (РУГ), блок дросселирования, расходомер Кориолиса. Система БРД позволяет остановить и устранить умеренное проявление пластового флюида без глушения скважины, а также оперативно обнаружить даже минимальные проявления и поглощение.

Уравновешивание давления вскрытого пласта регулируется сочетанием таких факторов, как давление на устье, эквивалентной циркуляционной плотности и плотности бурового раствора.

Для поддержания репрессии на пласт столбом жидкости плотностью $1,73 \text{ г/см}^3$ необходимо создать дополнительное противодействие на устье 9,5 МПа. Система БРД позволяет поддерживать градиент эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП) всех основных операций в пределах узкого окна бурения 1,88–2,0 МПа/100 м.

Проведено гидравлическое моделирование бурения на примере скважины 6 Гарцевская в условиях АВПД с проектной конструкцией по стандартной технологии и с предлагаемой конструкцией с технологией БРД.

При бурении с проектной конструкцией скважины 6 Гарцевская в условиях АВПД по стандартной технологии ожидается как НГВП, так и поглощение бурового раствора.

Установлено, что с применением технологии БРД на примере скважины 6 Гарцевская требуется «окно бурения» в 14 раз меньшее, чем при стандартной технологии, что является важным техническим преимуществом.

Технология БРД при вскрытии межсоловых отложений одной секцией диаметром 165,1 мм скважины 6 Гарцевская в условиях АВПД позволяет обеспечить ЭЦП во время всех операций в пределах «окна бурения».

Л и т е р а т у р а

1. Порошин, В. Д. Аномальные пластовые давления в межсоловых и подсоловых девонских отложениях Припятского прогиба / В. Д. Порошин, Н. Л. Лобова // Докл. АН БССР. – 1990. – Т. 34.
2. Роснефть: Применение систем контроля давления для скважин с трещиноватым коллектором в условиях аномально низкого пластового давления... // К. А. Чернокалов, А. Г. Пушкарский, А. М. Поляруш, М. И. Кошчер // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2016. – № 4. – С. 45–47.
3. Бабаян, Э. В. Технология управления скважиной при газонефтеводопроявлениях / Э. В. Бабаян. – Краснодар : Совет. Кубань, 2007, – 154 с.
4. Эффективный способ бурения скважин в условиях катастрофических поглощений в трещиноватых коллекторах Юрубчено-Тохомского месторождения / Р. Р. Гиниатуллин, В. В. Кириев, Д. Д. Крепостников [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 11. – С. 40–43. – DOI 10.24887/0028-2448-2017-11-40-43

ТЕСТИРОВАНИЕ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В КАЧЕСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ГЛУШЕНИЯ СКВАЖИН

В. Ю. Писарев

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

Научный руководитель Т. В. Атвиновская

Отмечено, что в границах нефтегазоносной области Припятского прогиба маловероятно открытие новых месторождений нефти со значительными запасами. По этой причине основным становится повышение коэффициента нефтеизвлечения. С этой целью производится большое число ремонтно-восстановительных работ. Следовательно, необходимо совершенствование технологии глушения скважин в направлении сохранения коллекторских свойств продуктивных пластов.

Ключевые слова: водонефтяные эмульсии, глушение скважин, «щадящее» глушение.

В пределах нефтегазоносной области Припятского прогиба не приходится ожидать открытия новых месторождений нефти со значительными запасами. Поэтому на первый план выходит повышение коэффициента нефтеизвлечения [1].

Цель исследования – приготовление водонефтяных эмульсий и оценка физико-химических свойств в контексте их использования в роли жидкости глушения.

В результате взаимодействия жидкости глушения скважин (ЖГС) с пластовыми флюидами и горной породой происходит ухудшение фильтрационных характеристик призабойной зоны пласта (ПЗП) [2]. Для предотвращения финансовых потерь, вызванных вышеперечисленными причинами, требуется оптимизация состава, объема и плотности ЖГС. Это позволит сократить объемы поступления фильтрата в ПЗП, повысить показатели работы скважин и снизить потери в добыче нефти.

Анализ влияния глушения на фильтрационно-емкостные параметры ПЗП и характер работы скважин в послеремонтный период, а также результаты лабораторных исследований по разработке широкого перечня ЖГС без твердой фазы при производстве подземного ремонта скважин и освоению скважин после бурения и капитального ремонта позволили рекомендовать к применению обратные водонефтяные эмульсии (ВНЭ) [3].

Анализ литературных данных показал, что для приготовления ВНЭ, обладающих достаточной гидрофобностью, высокой плотностью и остающимися стабильными в течение времени проведения ремонта скважин при пластовых давлениях и температурах, предпочтительнее применять не товарную (содержащую деэмульгатор), а сырую дегазированную нефть, минерализованную воду – для повышения плотности эмульсий и кроме этого стабилизатор (эмульгатор) [4].

Были проведены лабораторные исследования по разработке и оптимизации рецептур ВНЭ, адаптированных к промысловым условиям месторождений Припятского прогиба. В качестве компонентов ВНЭ включали товарную нефть, высокоминерализованную пластовую воду нефтяных месторождений Припятского прогиба или высококонцентрированный водный раствор хлорида кальция, а также эмульгатор. Для стабилизации ВНЭ в качестве эмульгатора хорошо зарекомендовал себя реагент «Нефтенол НЗ».

Состав образцов ВНЭ и значения их кинематической вязкости приведены в таблице.

Состав и кинематическая вязкость ν образцов ВНЭ

Номер образца	Состав, объемн. %	ν при 20 °С, мм ² /с
1	Нефть (50), пластовая вода $\rho = 1,20$ г/см ³ (48), «Нефтенол НЗ» (2)	170,4
2	Нефть (50), пластовая вода $\rho = 1,20$ г/см ³ (46), «Нефтенол НЗ» (4)	173,9
3	Нефть (50), пластовая вода $\rho = 1,20$ г/см ³ (46) «Нефтенол МЛ» (4)	106,7
4	Нефть (50), водный раствор CaCl ₂ $\rho = 1,19$ г/см ³ (48), «Нефтенол НЗ» (2)	176,1

Через 24 ч выдержки при комнатной температуре фазового разделения всех исследуемых образцов ВНЭ не наблюдалось. Однако на оптико-микроскопических изображениях проб ВНЭ (рис. 1) видно, что образец № 3, содержащий эмульгатор «Нефтенол МЛ», отчасти потерял агрегативную устойчивость, в нем начались процессы коалесценции.

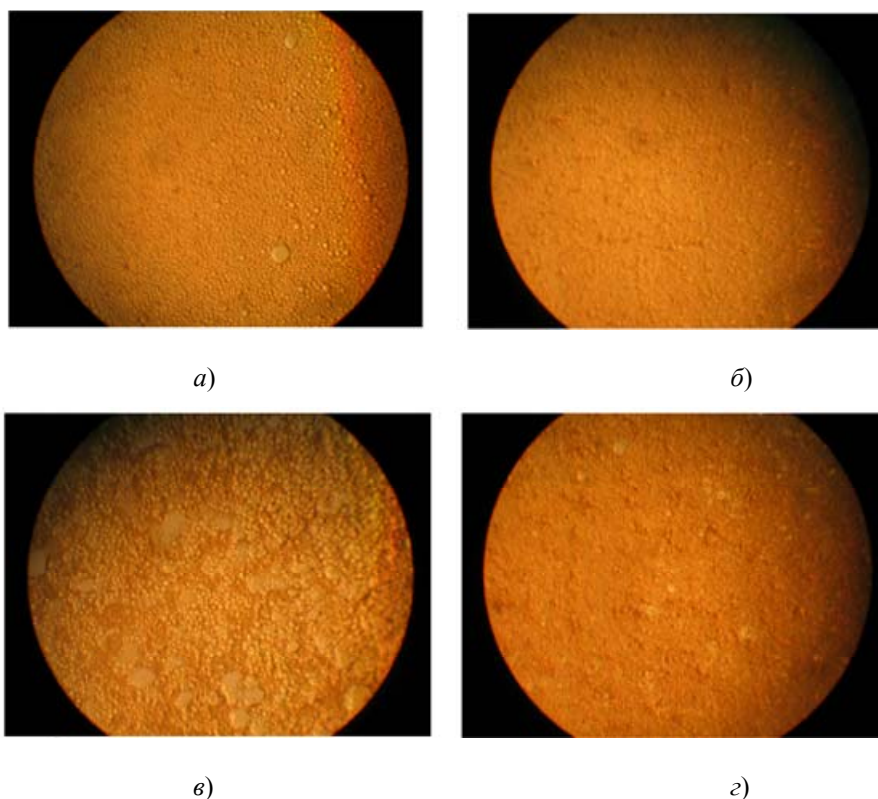


Рис. 1. Оптико-микроскопические изображения ВНЭ:
а–г – образцы № 1–4 соответственно. Увеличение 180 крат

Из данных рис. 1 и кинетики фазового разделения образцов следует, что по критерию фазовой стабильности наиболее оптимальным является состав ВНЭ, отвечающий образцу № 2. Степень разрушения такой ВНЭ при 70 °С составила 2 % за 12 ч и 56,5 % – за 24 ч. Эмульсия этого состава может быть рекомендована к опытно-промышленным испытаниям.

Таким образом, внедрение новых высокоэффективных технологий глушения скважин в совокупности с другими проводимыми работами и имеющимися техническими, экономическими и интеллектуальными предпосылками позволит добиться максимально возможного сохранения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов и улучшить технико-экономические показатели разработки залежей.

Литература

1. Классификация трудноизвлекаемых запасов углеводородов Припятского прогиба и основные проблемы их разработки / П. П. Повжик, А. Н. Цыбранков, С. П. Стельмашок, Н. А. Демяненко // Нефтяник Полесья. – 2018. – № 1. – С. 84–91.
2. Атвиновская, Т. В. Роль жидкостей глушения в процессе ремонта скважин / Т. В. Атвиновская // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 34–41.
3. Бруй, Л. К. Буровые и тампонажные растворы : учеб. пособие / Л. К. Бруй, Н. В. Шемлей, Т. В. Атвиновская. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 135 с.
4. Исламов, Ш. Р. Обоснование технологии глушения нефтяных скважин перед подземным ремонтом в условиях трещинно-поровых карбонатных коллекторов : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.17 / Исламов Шамиль Расихович ; С.-Петерб. гор. ун-т. – СПб., 2020. – 120 с.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАС-3D АНИМАЦИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЗАИМНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА С НАКЛОННЫМ БЛОКОМ

Д. А. Клевжиц

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

Исследовано применение системы КОМПАС-3D Анимация, предназначенной для анализа взаимного движения деталей при проектировании аксиально-поршневого гидронасоса (АПГН) с наклонным блоком. Использование анимации позволяет визуализировать работу механизма, выявить возможные ошибки в конструкции и повысить точность проектирования.

Ключевые слова: анимация, компоненты, 3D-модели, насос, проектирование.

Сценарий анимации – последовательность шагов, соответствующих отдельным перемещениям компонентов сборки. Каждому шагу могут соответствовать различные виды и параметры движения деталей, которые можно задавать последовательно или параллельно [1].

Как аналог для проектирования задан АПГН 210.56 (рис. 1).

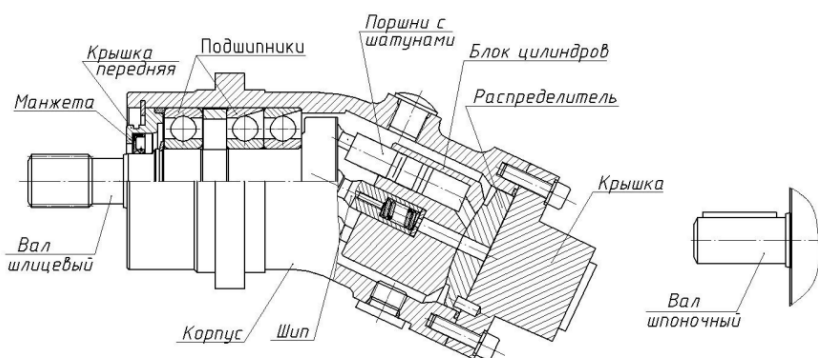


Рис. 1. АПГН 210.56 с наклонным блоком, нерегулируемый

На начальном этапе выполнены расчеты геометрических параметров деталей насоса: блока цилиндров, вала, торцевого распределителя, поршня и т. п. [2]. Выполнены прочностные расчеты вала, подшипников, шпоночного, резьбовых соединений и др. Также подбираются стандартные изделия: уплотнительные и стопорные кольца, болты с шайбами, винты и т. д. На основании проведенных расчетов создаются 3D-модели деталей, учитывая их точность, допуски и посадки (рис. 2, а–з).

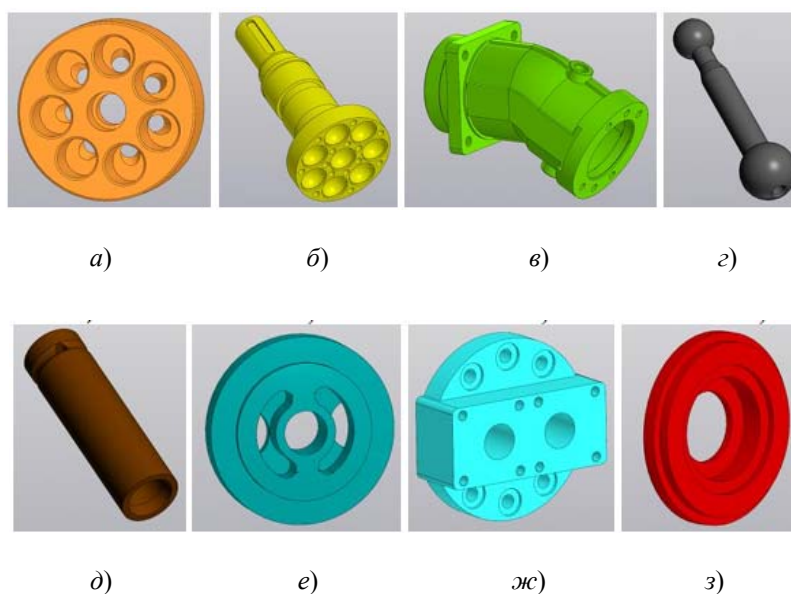


Рис. 2. 3D-модели деталей проектируемого насоса:
а – блок цилиндров; б – вал; в – корпус; г – шатун; д – поршень;
е – торцевой распределитель; ж – крышка задняя; з – крышка передняя

Анимации сборки насоса выполняется в следующей последовательности. В рабочее поле сборки добавляются все созданные 3D-модели деталей как специальные, ранее рассчитанные (рис. 2, а–з), так и различные крепежные изделия (болты, винты, штифт и шайбы), уплотнения (стопорные и уплотнительные кольца, манжета), пробки, подшипники качения и шпонка. При этом компоненты первоначально разносятся на некоторой расстоянии от основной системы координат, применяя в процессе компоновки насоса позиционирующие сопряжения и располагая рабочие органы насоса под заданным углом к валу насоса (рис. 3).

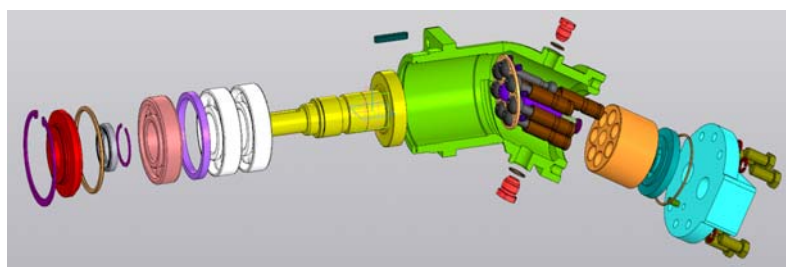


Рис. 3. Расстановка компонентов

Каждому добавленному компоненту назначаются траектории для задания прямолинейного или криволинейного движения (рис. 4). Начальная точка траектории ставится от той грани, от которой начинается движение, а конечная точка – в той пространственной координате, где должна находиться эта грань при перемещении по траектории.

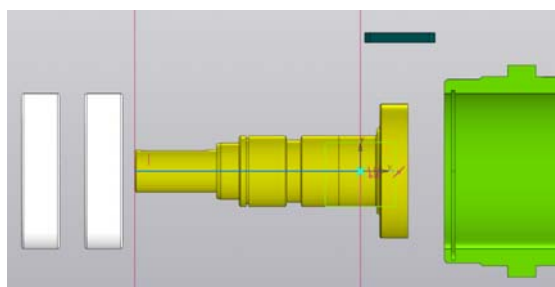


Рис. 4. Построение траекторий

После построения траектории создается файл анимации сборки. Последовательно задаются шаги, в которые будут входить добавление компоненты и их ракурсы изображения (рис. 5). Также добавляются построенные траектории перемещения с определенным направлением и временем (или скоростью) движения. Шаги задаются по порядку сборки насоса, начиная с шатунов и заканчивая шпонкой. Для крепежных изделий и трубопроводных соединений дополнительно придается вращение вокруг своей оси, чтобы имитировать их вкручивание с установленными параметрами движения.

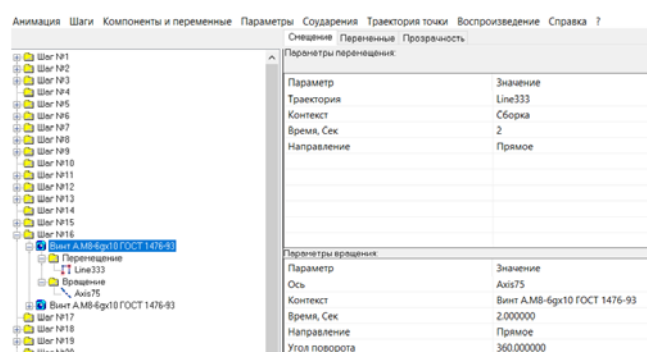


Рис. 5. Создание анимации сборки

При создании анимации сборки могут возникнуть проблемы с сопряжениями компонентов (они могут «перелетать» или двигаться не по траектории); с последовательностью шагов (шаги должны задаваться в соответствии с добавлением компонентов, иначе они будут двигаться некорректно); со скоростью и временем анимации (из-за разных размеров компонентов и соответственно траекторий, скорость их движения может быть слишком высокой или слишком низкой).

Анимация позволяет «отслеживать» коллизии, т. е. определять соударения компонентов в процессе движения. Этот механизм полезен при кинематическом анализе сборки. Команда «Соударение» позволяет определять «наложение» компонентов друг на друга в процессе движения, что позволяет находить ошибки в проектированных деталях и построенных траекториях. В настройках системы можно определить, останавливать ли анимацию при выявлении соударений.

При отсутствии коллизий фиксируется сценарий анимации сборки насоса со всеми взаимодействиями, получая полностью собранный насос (рис. 6).

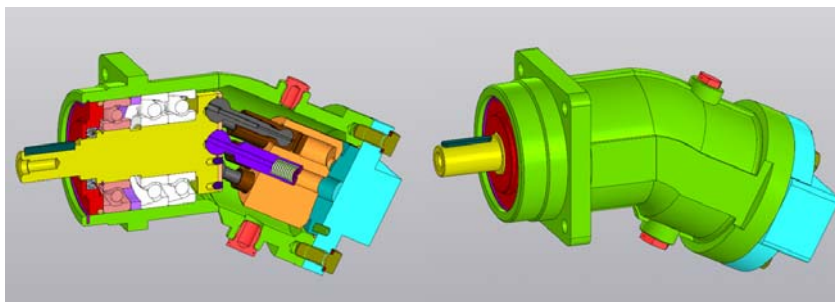


Рис. 6. Насос в сборе

После сборки насоса создается анимация его работы. Задаются шаги, в которые войдет основной комплект деталей для имитации работы насоса (рис. 7). Устанавливаются сопряжения между гнездами на фланце вала, поршнями, блоком цилиндров и т. д. Задаются направление, частота вращения и угол поворота деталей. Также устанавливается прозрачность блока цилиндров, чтобы детально наблюдать перемещение поршней и изменение рабочих камер в процессе работы.

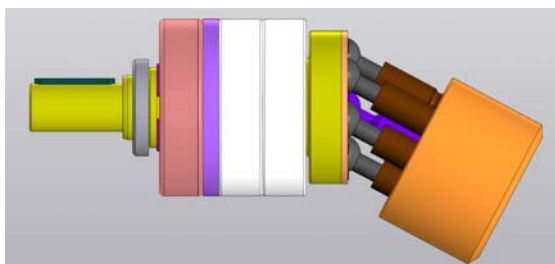


Рис. 7. Комплект деталей для анимации работы насоса

При создании анимации работы могут возникнуть проблемы с синхронизацией движения (поршни, вал, подшипники и т. д. должны двигаться согласовано, малейшее смещение сделает анимацию некорректной); с сопряжениями (важно точно задать зависимости и вращения, чтобы избежать неестественного движения и пересечения деталей); с циклической анимацией (повторяющиеся движения могут «сбиваться», если задать не точные параметры вращения).

При отсутствии ошибок и коллизий анимация будет полностью имитировать движение проектируемого насоса.

Использование КОМПАС-3D Анимация позволяет наглядно продемонстрировать движение механизмов, визуализировать работу отдельных узлов и компонентов, а также выявить потенциальные проблемы в их взаимодействии.

Литература

1. Механика: Анимация. Машиностроительное приложение / САПР Компас-3D. – URL: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/animation/>.
2. Объемные гидро- и пневмомашины : учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» днев. и заоч. форм обучения / Д. В. Лаевский, Ю. А. Андреев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 137 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. Ю. Писарев

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

Научный руководитель И. И. Злотников

Рассмотрена технология нанесения оксидно-керамических покрытий на изделия из алюминиевых сплавов методом микродугового оксидирования. Процесс проводили на переменном токе частотой 50 Гц при постоянной плотности тока 6 А/дм^2 с использованием щелочно-силикатного электролита. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению коррозионной стойкости полученных покрытий, в том числе в условиях контактной коррозии. Установлено, что покрытие успешно защищает поверхность алюминиевых деталей от различных видов коррозии. Отмечено, что особенно эффективно применение оксидно-керамических покрытий в условиях контактной коррозии «алюминий–сталь».

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминиевые сплавы, контактная коррозия, коррозионностойкие покрытия.

Технология микродугового оксидирования (МДО) заключается в том, что под действием высокого напряжения, создаваемого между находящейся в электролите деталью (анодом) и катодом, на поверхности детали возникают мигрирующие точечные микродуговые разряды, под действием которых поверхностный слой детали оксидируется с образованием керамического покрытия, прочно сцепленного с основой. Получаемое покрытие состоит преимущественно из кристаллического оксида материала анода – для алюминия это $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ во внутренних слоях покрытия и муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) – во внешних. Такие покрытия обладают повышенной твердостью, износостойкостью, высокими диэлектрическими свойствами и находят применение в различных областях техники. Регулируя составы электролита и режимы проведения оксидирования, можно получать антикоррозионные и износостойкие, декоративные и изоляционные, теплозащитные и упрочняющие покрытия. В настоящее время МДО считается наиболее перспективным способом модифицирования поверхности деталей из алюминиевых сплавов, так как позволяет получать покрытия с более высокими физико-химическими и механическими свойствами по сравнению с другими методами [1].

Алюминиевые сплавы благодаря прочности, легкости и простоте обработки получили большое распространение при изготовлении различных деталей и узлов машин. Высокие эксплуатационные качества и большое разнообразие сплавов с различными свойствами позволили алюминию найти широкое применение и в нефтедобывающей промышленности. В настоящее время успешно применяются такие изделия, как буровые, насосно-компрессорные, обсадные и прочие виды труб, элементы насосно-компрессорного оборудования, резервуары для транспортирования и хранения нефти, фасонные изделия и др. В нефтяной промышленности одними из главных достоинств алюминиевых изделий становятся их низкий удельный вес и более высокая удельная прочность, вследствие чего, в частности, снижаются затраты на проведение спуско-подъемных операций. Это имеет особое значение в современных условиях, когда возрастает необходимость разработки новых залежей, располагающихся на больших глубинах и в более сложных геологических пластах. Но алюминий и его сплавы в контакте со сталями образуют контактную гальваническую пару, в которой алюминий, имея более отрицательный электрохимический потенциал, является анодом и подвергается коррозионному разрушению. Данная проблема возникает при соединении алюминиевых труб стальным замком, в резьбовых соединениях и при других типах фиксации деталей на основе алюминия с помощью стального крепежа. К одному из методов защиты алюминиевых сплавов от коррозии относится нанесение на детали защитных коррозионностойких покрытий, в частности, методом МДО [2].

Цель работы – используя технологию МДО, нанести на поверхность алюминиевых образцов защитное оксидно-керамическое покрытие и изучить его коррозионную стойкость, в том числе в условиях контактной коррозии.

Покрытия наносили на алюминиевую фольгу марки АД1 толщиной 100 мкм. Основываясь на ранее проведенных в ГГТУ им. П. О. Сухого исследованиях [3, 4], в качестве электролита использовали раствор, содержащий силикат натрия (натриевое жидкое стекло) в количестве 50 г/л и гидроксид калия – 2 г/л. Процесс МДО проводили в симметричном анодно-катодном режиме на переменном токе частотой 50 Гц при постоянной плотности тока $j = 6 \text{ А/дм}^2$, которую поддерживали, повышая напряжение по мере роста толщины покрытия, начиная с нескольких вольт до 260 В. Коррозионные испытания проводили по ускоренной методике, приближенной к ГОСТ 9.042-75 при постоянном погружении образцов в 3%-й раствор NaCl при температуре $50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Для проведения испытаний на контактную коррозию изготавливали конструктивно-подобный образец, имитирующий болтовое соединение «алюминий–сталь». Контактная пара состояла из прямоугольного образца алюминия АД1 без покрытия или с покрытием и шайбы М10 из стали марки ст.3. Два испытуемых металла скрепляли болтовым соединением (болт и гайка М8 из стали марки С1035 с цинковым покрытием). Контактная пара была отделена от материала болта и гайки прокладкой из полиэтилена.

Результаты коррозионных испытаний алюминиевых образцов без покрытия и с покрытием приведены в таблице.

Результаты испытаний на коррозию

Время испытаний	Без покрытия	С покрытием
2,5 суток	Первые признаки коррозии в виде мелких белых хлопьев	Признаков коррозии нет
5 суток	Почти сплошная коррозия	
7 суток	Сплошная коррозия с признаками язвенной	

Как свидетельствуют полученные результаты, нанесение методом МДО оксидно-керамических покрытий обеспечивает высокую стойкость образцов из алюминия в условиях воздействия агрессивной среды.

На рис. 1 показан вид конструктивно-подобного образца, используемого для исследования на контактную коррозию.

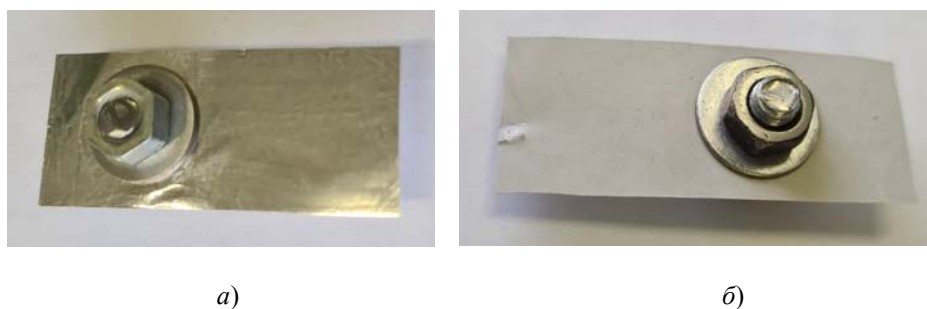


Рис. 1. Исходный конструктивно-подобный образец без покрытия (а) и с покрытием (б)

На рис. 2 приведен вид контактной пары после 3 суток испытаний на коррозию. Видно, что при использовании алюминиевого образца без покрытия оба металла подвержены коррозии. При этом в местах непосредственного контакта металлов коррозия алюминия и стали носит сплошной характер. За пределами контакта признаки коррозии на поверхности алюминия прослеживаются до расстояния 5–10 мм. В случае алюминия с покрытием на стальной шайбе видны начальные признаки коррозии, а на алюминии с покрытием признаков коррозии нет по всей площади образца.

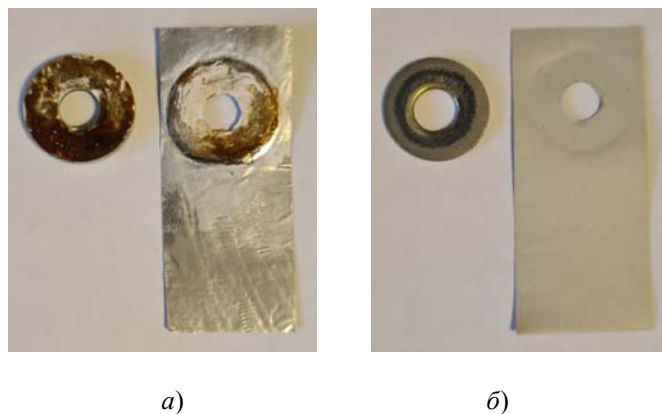


Рис. 2. Разобранный конструктивно-подобный образец после испытаний на коррозию без покрытия (а) и с покрытием (б)

Таким образом, проведенные исследования показали, что технология МДО позволяет получать на поверхности изделий из алюминия керамическое покрытие, стойкое к воздействию агрессивных сред. Такое покрытие может успешно защищать алюминиевые детали от различных видов коррозии. Особенно эффективно применение МДО-покрытий в условиях контактной коррозии «алюминий–сталь».

Литература

1. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин [и др.]. – М. : ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
2. Трушкина, Т. В. Коррозионная стойкость МДО-покрытий в агрессивных средах / Т. В. Трушкина, А. Е. Михеев, А. В. Гирн // Вестник СибГАУ. – 2014 – № 1. – С. 179–184.
3. Злотников, А. И. Повышение межслоевой адгезии в гибких фольгированных диэлектриках методом микродугового оксидирования / А. И. Злотников, Г. В. Петришин, И. И. Злотников // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого. – 2023. – № 1 (92). – С. 41–47.
4. Злотников, И. И. Повышение антифрикционных свойств керамических покрытий, полученных методом МДО на алюминиевых сплавах / И. И. Злотников, В. М. Шаповалов // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 5. – С. 128–131.

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

М. В. Невзоров

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

Научный руководитель Г. В. Петришин

Отмечено, что в последние годы функционализированные металлические порошки вызывают все больший интерес в аддитивном производстве (в частности, в лазерной порошковой плавке) благодаря их улучшенной текучести и технологичности, которые могут обеспечить более высокие конечные механические или физические свойства напыляемых покрытий на детали, такие, как повышенная твердость, более высокая прочность и плотность. Представлен анализ получаемых в настоящее время порошковых покрытий и процессов, используемых для их производства, технологичность систем с покрытиями, полученными с помощью лазерной наплавки.

Ключевые слова: функционализированные металлические порошки, покрытия, лазерная наплавка.

Технологии производства, основанные на порошковой металлургии (ПМ), играют важную роль в нескольких различных отраслях промышленности [1, 2], в том числе и в области технологии обработки новых или изношенных деталей машиностроительного оборудования для получения износостойких и прочных поверхностных покрытий. Необходимость получения таких покрытий привела к разработке функционализированных базовых материалов [3] и оптимизации технологических процессов. В связи с этим в ремонтных работах значительно расширилось использование модифицированных металлических порошков с покрытием, что позволяет улучшить обрабатываемость порошков или изменить микроструктуру, механические, физические и термические свойства готовой детали. Покрывая поверхность порошков, можно изменять температуру плавления [4], сыпучесть и поглощающую способность [5] самого порошка.

Микроструктурные характеристики также могут быть изменены путем нанесения второй фазы, в частности, нанокерамических частиц, таких, как структуры на основе ZrO_2 , Al_2O_3 , B_4C , SiC , TiB_2 , C [6]. Это может привести к появлению механизмов измельчения зерна, что повышает механическую прочность [7]. Механические свойства готовых изделий, такие как прочность на сжатие, твердость, предел текучести, и физические свойства, такие, как плотность, можно улучшить, используя порошки с покрытием [8].

Аддитивное производство, к которому можно отнести и лазерную порошковую наплавку (ЛПН), подходит для получения покрытий на поверхностях различной геометрической формы. Отметим, что ЛПН – это послойный процесс, при котором лазерный луч применяется для выборочного плавления металлических порошков; затем расплавленный слой затвердевает с высокой скоростью охлаждения [9]. Чтобы гарантировать равномерное распределение порошков в каждом слое, порошки, используемые для ЛПН, должны характеризоваться хорошей текучестью и сферической морфологией.

Цель работы – провести краткий обзор современных систем покрытий (порошок + покрытие на него) с описанием применяемых методов нанесения покрытий с целью анализа и понимания возможностей улучшения обрабатываемости деталей посредством ЛПН с повышением их механических свойств.

Порошки основных металлов. Стальные порошки широко используются в широком спектре промышленных областей благодаря их высокой пластичности, высокой прочности, высокой коррозионной стойкости [10]. Аустенитные порошки нержавеющей стали однако показывают низкую твердость и относительно низкую износостойкость; стратегия повышения твердости и износостойкости заключается в покрытии металлических порошков керамическими наночастицами (например, TiB_2), действующими как измельчитель зерна. Добавление керамических частиц может повысить рабочую температуру и механические свойства. Металлические порошки из алюминия и его сплавов обладают высокой удельной прочностью, высокой коррозионной стойкостью, хорошей теплопроводностью и хорошими механическими свойствами. Чистая медь широко используется в электронных приложениях и компонентах теплопередачи в различных секторах из-за ее превосходной паяемости и низкой электрохимической миграции, превосходной электро- ($58,7 \times 10^6$ См/м) и теплопроводности (400 Вт/(м · К)).

Процессы нанесения покрытий на металлические порошки. Как правило, процессы нанесения покрытий состоят из осаждения частиц или ионов на металлические порошки; эта цель достижима механическими или немеханическими методами, подробно описанными в статье. Немеханические методы состоят из широкого спектра физических и термических процессов с определенными вариациями. Было разработано несколько процессов, включающих растворение, химические и физические методы для нанесения покрытий на порошки, которые используются для решения некоторых критических проблем методов механического нанесения покрытий.

Процессы нанесения модифицированных функциональных металлических порошков разнообразны и включают множество аспектов, таких, как обрабатываемость, механические и физические свойства. Возможны различные способы нанесения покрытий. Так называемые механические методы нанесения покрытий были одними из первых принятых. Однако, когда задействована высокая энергия, происходит сильная пластическая деформация, изменяющая форму порошков и ухудшающая их текучесть. С другой стороны, процессы нанесения покрытий, включающие химические растворы, не влияют на геометрию и распределение размеров порошков, обычно приводя к однородным и непрерывным покрытиям. Эти процессы характеризуются различными трудностями, такими, как ограниченное количество порошка, которое можно обработать вместе, затраты и сложность самого процесса. По этим причинам обязательно оценить новые методы, которых в настоящее время нет на рынке, чтобы получить постоянное и однородное покрытие, которое может обеспечить более высокую обрабатываемость. Порошки с покрытием могут улуч-

шить обрабатываемость L-PBF с точки зрения более высокой текучести и поглощения, особенно для тех металлов, которые характеризуются высокой отражательной способностью лазера.

Модификация поверхности порошка может преследовать более высокую поглощательную способность лазера. Здесь задействованы два основных фактора:

- шероховатость поверхности, которая обычно увеличивается за счет покрытий;
- выбор материала покрытия с высоким коэффициентом поглощения.

Несколько параметров также влияют на текучесть. Более высокая шероховатость поверхности может отрицательно повлиять на нее, тогда как керамические наночастицы могут ее увеличить из-за внутренних низких сил Ван-дер-Ваальса.

Таким образом, механические свойства конечных деталей также могут быть улучшены путем наплавления поверхностного слоя модифицированными функциональными металлическими порошками. Твердость поверхности может быть увеличена за счет использования частиц керамического покрытия или за счет эффекта измельчения зерна. Использование металлических порошков, однородно покрытых наночастицами, может привести к улучшению адгезии и твердости поверхностного слоя.

Л и т е р а т у р а

1. Ильющенко, А. Ф. Исследование характеристик специальных порошков и материалов, полученных методом селективного лазерного сплавления / А.Ф. Ильющенко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 150–160.
2. Магнитно-абразивная обработка труднообрабатываемых материалов новыми диффузионно-легированными материалами / Ю. Ольт, В. В. Максаров, Г. В. Петришин [и др.] / СТИН. – 2023. – № 1. – С. 22–25.
3. Упрочнение и восстановление поверхностей деталей: лабораторный практикум : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений по металлургич. и машиностроит. специальностям / К. В. Буйкус, С. В. Григорьев, В. А. Оковитый [и др.]. – Минск : БНТУ, 2010. – 342 с.
4. Пантелеенко, Е. Ф. Функциональные покрытия из дисперсных металлических отходов / Е. В. Пантелеенко, Г. В. Петришин // Инновации в машиностроении (Инмаш-2015) : сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 23–25 сент. 2015 г. / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Кемерово, 2015. – С. 355–360.
5. Металлографические исследования лазерной наплавки износостойких порошков на инструмент / М. А. Чернова, Р. М. Хисамутдинов, В. В. Звездин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2015. – Т. 4, №. 11.
6. Иванов, А. С. Анализ порошков для лазерной наплавки при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники / А. С. Иванов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 5 (91). – С. 125–129.
7. Ильющенко, А. Ф. Современные разработки в области порошковой металлургии для машиностроения / А. Ф. Ильющенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3-4. – С. 113–120.
8. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, В. В. Оковитый [и др.] // Наука и техника. – 2018. – №. 5. – С. 378–389.
9. Пантелеенко, Ф. И. Прогрессивные технологии лазерной наплавки и газотермического напыления / Ф. И. Пантелеенко, П. Жэн // Литье и металлургия. – 2024. – №. 3. – С. 61–65.
10. Пантелеенко, Ф. И. Влияние активатора на интенсивность химико-термической обработки микрообъектов различных структурных классов / Ф. И. Пантелеенко, М. Н. Карпец // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – №. 1 (88). – С. 33–38.

ПРОЦЕСС АДАПТАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А. А. Бугримов

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

Научный руководитель О. К. Абрамович

Отмечено, что гидродинамические модели играют ключевую роль в решении задач, связанных с движением жидкостей и газов, но их прямое применение часто ограничено сложностью реальных систем, что требует адаптации моделей под конкретные параметры.

Ключевые слова: нефтегазозащработка, моделирование, адекватность, адаптация.

Процесс разработки нефтяных и газовых месторождений поддается моделированию, но при создании гидродинамической модели приходится сталкиваться со сложностями в подборе математического аппарата вследствие задействования большого количества сложно зависимых параметров. Гидродинамическое моделирование используют для прогнозирования поведения нефтяных пластов и оптимизации их разработки. Успешность моделирования зависит от способности модели точно воспроизводить реальные процессы, т. е. от степени ее адекватности [1].

Адекватность гидродинамической модели – это ее способность воспроизводить исторические данные месторождения с допустимой погрешностью. Критерии оценки созданной модели включают соответствие параметров, определенных по модели, параметрам, восстановленным по истории разработки, основные из которых – дебиты нефти, газа и воды, динамика пластового давления, результаты геофизических исследований скважин (распределение насыщенности и пористости, геологические данные (литология, тектонические особенности).

Допустимый процент отклонения устанавливается на основе отраслевых стандартов, например, $\pm 5\text{--}10\%$ для дебитов [2]. Для оценки модели могут использоваться статистические методы, к примеру, сравнение среднеквадратичных ошибок и экспертные оценки, учитывающие неопределенность исходных данных.

В моей работе процесс адаптации гидродинамической модели и эффективность ее оценки рассматриваются, в основном, на примере построения модели Романовского месторождения Российской Федерации. Промышленные залежи нефти месторождения установлены в отложениях нижнего мела и юры. Они являются основным нефтегазоносным комплексом рассматриваемого района.

В качестве структурного каркаса трехмерных моделей использовались стратиграфические карты кровли и подошвы пластов, построенные на этапе двумерного моделирования с учетом разбивок стратиграфических границ.

Вертикальное расслоение пластов проводилось по пропорциональной модели. Для выделения флюидонасыщенной части пластов использовалась поверхность ВНК, которые проверены на предмет замыкания залежей и соответствия характера насыщения проницаемых пропластков выше и ниже контактов флюидов.

Выбор размера сетки трехмерной геологической модели производился, исходя из анализа общей толщины пластов, размеров структур, расстояний между скважинами в соответствии с рекомендациями регламента по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных месторождений. Горизонтальный размер ячеек (по осям X и Y) составил для большинства пластов 50×50 м. Каждой ячейке сетки соответствует одно значение 3D-параметра, поэтому скважинные данные

усреднены до размеров ячеек сетки. Осреднение проводится на основе дискретной кривой литологии. Метод осреднения – средневзвешенный по толщине [3].

Осреднение скважинных данных включает в себя два этапа: первый – определение ячеек сетки, через которые прошли скважины, и второй – определение скважинных данных для каждой такой ячейки путем осреднения. В результате каждой ячейке, через которую прошла скважина, присваивается одно значение соответствующего параметра.

Моделирование куба литологии (*LITO*) производилось стохастическим пиксельным методом «последовательного индикаторного моделирования». Для моделирования кроме данных интерпретации ГИС в скважинах использовалась информация о расположении линий замещения коллекторов в пластах, по которым создавались замкнутые полигоны в пределах трехмерных моделей. По созданным полигонам строились дискретные параметры, характеризующие распространение зон замещения коллекторов. Эти зоны встраивались в итоговую литологическую модель с кодом «неколлектор». Месторождение смоделировано с достаточной степенью детальности. При создании модели использовался современный математический аппарат геостатистических и детерминистских технологий.

Гидродинамическое моделирование проводилось с помощью гидродинамического симулятора *tNavigator* компании *RFD* и *Tempest More* компании *Roxar*.

Математическая модель основана на уравнениях трехмерной трехфазной фильтрации [4].

Входными данными для модели являются: трехмерная геологическая модель пласта, каждая ячейка которой характеризуется фильтрационно-емкостными свойствами пород, начальное распределение насыщенностей флюидами и пластовое давление, функции капиллярных давлений и относительных фазовых проницаемостей, физические свойства фаз, информация о работе скважин, счетные параметры численного метода и параметры управления работой программы. В качестве начальных условий в пластах по насыщенности были заданы отметки водонефтяных контактов и кубы начальной и остаточной нефтенасыщенности. Модель насыщения пласта флюидами принята равновесной.

Для оценки построенной литологической модели производилось вычисление объемов коллекторов в нефтенасыщенной части пласта. Полученные результаты сравнивались с данными, рассчитанными интегральным способом. Адаптация модели к реальным условиям – это оценка решения обратной задачи, итерационный вычислительный процесс, приводящий к удовлетворительному соответствию между контрольными показателями реального процесса разработки залежи нефти и показателями построенной модели. Именно поэтому сходство ответных реакций на одинаковые внешние воздействия модели и объекта является одним из важнейших признаков, на основе которого оценивается качество построенной модели.

Отмечаемое в процессе адаптации несоответствие расчетных и фактических показателей, обусловлено тем, что большинство параметров модели не поддаются непосредственному измерению, и их приближенные значения оцениваются косвенно через другие переменные. Наличие погрешностей измерения, интерполяция, неполнота исходной информации, схематизация и упрощение структурных, фильтрационно-емкостных, физико-механических и физико-химических свойств пластовой системы – все это усложняет решение обратных задач и приводит к тому, что оцениваемые параметры и состояния могут определяться неоднозначно.

Основным инструментом адаптации модели на Романовском месторождении были локальные изменения куба проницаемости, проведено горизонтальное масштабирование ОФП путем задания краевых точек *SWL* (связанная водонасыщенность),

$SWCR$ (критическая водонасыщенность). Эти точки задавались отдельными кубами. Для вычисления куба SWL была найдена корреляция от пористости вида $SWL = A \cdot PORO + B$, эта корреляция подбиралась в ходе адаптации ГДМ на исторические замеры обводненности по скважинам. В итоге принята корреляция $SWL = -1,16 \cdot PORO + 0,474$ [5].

Куб $SWCR$ рассчитывался как $SWL + \text{const}$, где константа также подбиралась в ходе адаптации модели.

В некоторых местах был добавлен коллектор в небольших количествах, в целом была проведена детализация геологического строения месторождения на основе соответствия дебитов.

Гидродинамические расчеты по адаптации геолого-математической модели проводились при заданных по скважинам средних суточных объемах отборов жидкости с учетом фактических дней эксплуатации скважин и коэффициента продуктивности. Сравнение фактических и расчетных показателей разработки проводилось на конец каждого месяца. По накопленным показателям добычи нефти и жидкости за весь исторический период отклонения от фактической истории незначительны: накопленная добыча нефти в моделях на последнюю дату адаптации модели отличаются от фактической менее чем на 5 %.

Адаптация по скважинам также имеет удовлетворительную точность, 80 % накопленной добычи нефти по модели обеспечивают скважины с отклонением от фактической накопленной добычи нефти менее 20 %. По нескольким скважинам, из числа давших в сумме 80 % накопленной фактической добычи нефти, отклонение превышает 20 %, что обусловлено проведением на этих скважинах ОПЗ химреагентами, многократных смен насосного оборудования, эффект которых трудно в полной мере воспроизвести в ГДМ.

С позиции математической постановки можно выделить необходимые и достаточные условия адекватности модели реальным объектам. Традиционным подходом при построении модели является достижение заданной невязки между расчетными значениями и наблюдаемыми значениями поля. Достижение заданной невязки по отдельно взятому полю – условие адекватности. Однако по отдельно взятому полю практически всегда можно подобрать модель, удовлетворяющую заданной невязке. В то же время для другого поля та же модель может существенно превосходить невязку. Поэтому важно подобрать такую модель, которая грубо, но будет удовлетворять всем полям. В качестве достаточного условия адекватности модели реальным объектам можно использовать минимальное обобщенное расстояние. Для быстроты адаптации и расчета возможно пользоваться процедурой масштабирования.

Использование излишне сложных моделей, содержащих большое число искомым параметров, приводит в случае малых выборок к неустойчивости, подобной неустойчивости некорректно поставленных задач.

Л и т е р а т у р а

1. Абрамович, О. К. Применение ЭВМ в расчетах по разработке, эксплуатации нефтяных месторождений : пособие по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-51 02 02 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» днев. и заоч. форм обучения / О. К. Абрамович. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 137 с.
2. Бравичева, Т. Б. Компьютерное моделирование процессов разработки нефтяных месторождений : учеб. пособие / Т. Б. Бравичева, К. А. Бравичев, А. О. Палий. – М. : ИЦ РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2013. – 245 с.
3. Геологическое и гидротермодинамическое моделирование месторождений нефти и газа / Р. М. Тер-Саркисов, В. М. Максимов, К. С. Басниев [и др.]. – М. ; Ижевск : ИКИ 2015. – 452 с. – Серия «Современные нефтегазовые технологии».

4. Гладков, Е. А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа : учеб. пособие / Е. А. Гладков. – Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2012. – 84 с.
5. Закревский, К. Е. Геологическое 3D моделирование / К. Е. Закревский. – М., 2009. – 376 с.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

М. А. Янковец, О. К. Гурбан

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

Научный руководитель В. В. Пинчук

*Описано повышение эффективности проектирования гидроблоков управления приво-
дов технологического оборудования через внедрение автономных модулей и декомпозицион-
ных методов анализа задач. Указано, что предлагаемый подход включает три этапа: фор-
мулирование потребностей и целей нового объекта, декомпозиция задач на более простые
компоненты, выбор оптимальных решений из множества альтернатив. Акцентировано
внимание на важности системного подхода и применения научных принципов в процессе
проектирования. Отмечено, что реализация разработанных методов на конкретных при-
мерах гидроблоков управления позволит проверить их эффективность и обеспечить посто-
янное совершенствование проектных процессов.*

Ключевые слова: приводы технологического оборудования, гидроблоки управления, технологические машины, гидроаппараты, критерий оптимальности.

Целью предлагаемых исследований является повышение эффективности проектирования гидроблоков управления приво-дов технологического оборудования (ГУ ТО) путем интеграции автономных модулей, которые будут формировать структуру создаваемых объектов и процессов на уровне инновационных результатов (изобретений) на ранних стадиях их проектирования.

Для достижения этой цели необходимо выявить особенности и возможности применения декомпозиционных методов анализа задач для получения новых знаний непосредственно при проектировании гидроблоков управления приво-дов технологического оборудования.

Разработка и обоснование методов оптимизации основаны на декомпозиционном анализе с учетом многомерных целей, связанных с качеством, надежностью и эффективностью гидроблоков управления приво-дов технологического оборудования.

В свою очередь, создание комплекса алгоритмов для решения задач формиро-вания структуры гидроблоков управления приво-дов технологического оборудования позволит учитывать различные критерии при их проектировании.

Реализация разработанных методов с использованием созданного обеспечения на примерах проектирования конкретных гидроблоков управления поможет в прак-тическом применении теоретических разработок.

Таким образом, интеграция современных методов проектирования и оптимиза-ции критериев при расчете ГУ ТО является ключом к созданию инновационных и эффективных решений в области проектирования. Это не только повысит качество и надежность гидроблоков управления, но и значительно улучшит общую эффек-тивность технологических процессов, что в конечном итоге приведет к снижению затрат и повышению конкурентоспособности данных изделий.

Для достижения высоких результатов в проектировании ГУ ТО необходимо интегрировать несколько ключевых методов. В первую очередь, это касается применения декомпозиционных методов анализа задач, позволяющих разбивать сложные проектные задачи на более простые и управляемые компоненты. Такой подход не только упрощает процесс проектирования, но и способствует выявлению новых решений, которые могут быть упущены при традиционном подходе.

Оптимизация критериев проектирования является важным этапом, который требует учета множества факторов, таких, как качество, обеспечивающее надежность и долговечность гидроблоков управления, способствует минимизации затрат на производство и эксплуатацию. Важным фактором является также экологичность, что ведет к снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Разработка методов оптимизации на основе декомпозиционного анализа с учетом многомерных целей позволит находить баланс между этими критериями. Например, использование многоцелевых алгоритмов может помочь в нахождении оптимальных решений, которые учитывают как технические, так и экономические аспекты проектирования.

Создание специализированных алгоритмов и программного обеспечения для повышения эффективности процесса проектирования монтажных корпусов ГУ ТО станет важным шагом к повышению производительности.

Создавая инструменты, которые способствуют тому, чтобы автоматически генерировать проектные решения на основе заданных параметров, а в последствии оценивать и сравнивать различные варианты проектирования по установленным критериям.

Реализация разработанного метода и алгоритма на конкретных примерах проектирования ГУ ТО позволяет проверить их эффективность и целесообразность. Это позволяет провести эксперименты для оценки качества и надежности разработанных решений, получить сбор и анализ данных о производительности ГУ ТО в условиях реальной эксплуатации и при необходимости произвести корректировку метода и алгоритмов на основе полученных данных, что обеспечит постоянное совершенствование процесса проектирования.

Использование философских концепций формирования структурных решений для гидроблоков управления в процессе получения инновационного результата проектирования нового гидроблока управления представим в виде последовательного решения задачи (рис. 1).

На первом этапе необходимо сформулировать потребности в новом объекте, его функции и место в иерархии других объектов. Это позволяет установить цели и критерии для дальнейшей работы. На этом этапе задача разделяется на более мелкие, относительно независимые части, которые характеризуются определенными свойствами (признаками) создаваемого объекта. Важно указать множества альтернатив реализации каждого признака, что формирует многомерное поисковое пространство. На втором этапе производим расчленение целого на части, что позволяет выявить истинную проблему. Этот анализ помогает понять, какие именно аспекты требуют внимания и доработки. Третий этап включает в себя «свертку поискового пространства», образованного в результате декомпозиции. На этом этапе осуществляется выбор для каждого свойства варианта реализации из множества альтернатив.

Оптимизация критериев проектирования требует учета множества факторов, таких, как качество, надежность и экологичность, что ведет к снижению негативного воздействия на окружающую среду. Разработка методов оптимизации на основе декомпозиционного анализа с учетом многомерных целей позволит находить баланс между этими критериями.

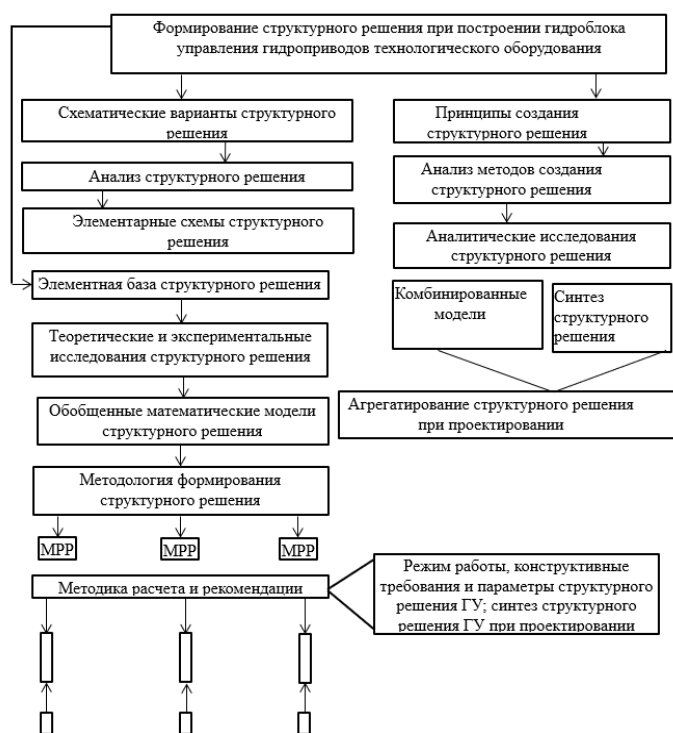


Рис. 1. Структурная схема этапов формирования оптимального решения по созданию структуры гидроблока управления привода технологического оборудования

Создание специализированных алгоритмов и программного обеспечения для повышения эффективности процесса проектирования гидроблока управления технологического оборудования станет важным шагом к повышению производительности. Инструменты, которые автоматически генерируют проектные решения на основе заданных параметров, позволят оценивать и сравнивать различные варианты проектирования по установленным критериям.

При равнозначности критериев задача решается оптимизацией по Парето, а также используются метод идеальной точки и метод контрольных показателей.

Целью оптимизации по Парето является поиск оптимальных (доминирующих) точек. Оптимальными точками являются неуправляемые значения – точки, лучше которых нельзя подобрать по всем критериям. Это означает, что без уточнения приоритетности критериев при дальнейшем выборе будут рассматриваться варианты из множества оптимальных точек.

Если в угле, ограниченном лучами, берущими начало в точке и направленными вдоль осей по направлению улучшения полезности, не найдется ни одной точки, то данная точка является оптимальной.

Многокритериальная оптимизация – это раздел математического программирования, а также метод решения задач, которые состоят в поиске наилучшего (оптимального) решения, удовлетворяющего нескольким несводимым друг к другу критериям.

Существует 3 основных типа задач многокритериальной оптимизации: 1) в задаче критерий f_1 приоритетнее, чем критерий f_2 , или критерий f_2 приоритетнее, чем f_1 ; 2) задача сводится к минимизации функции; данный метод носит название линейной свертки; 3) критерии равнозначны в условиях рассматриваемой задачи.

Алгоритм структурного синтеза может быть представлен последовательностью шагов, включающих просмотр базы декомпозиционных схем, ввод характеристик, присвоение рангов альтернативам и автоматический выбор лучших решений. В соответствии с рассмотренными методами и алгоритмом формирования оптимальных по Парето структурных решений при проектировании технических объектов значение каждого из показателя, характеризующего систему, не может быть улучшено без ухудшения других.

Применение философских категорий «Часть и целое» в процессе формирования структурных решений для гидроблоков управления позволяет систематизировать подход к проектированию и оптимизации. Это способствует более глубокому пониманию задачи и созданию эффективных, инновационных решений, отвечающих современным требованиям технологического оборудования.

Таким образом, использование метода математического моделирования дает возможность определить конструкционные параметры гидроблока управления технологического оборудования, разработать гидравлический привод технологического оборудования с наименьшими затратами.

Л и т е р а т у р а

1. Гурбан, О. К. Оптимизация критериев при расчете и проектировании монтажных корпусов гидроблоков управления / О. К. Гурбан, В. В. Пинчук, А. А. Гинзбург // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2024. – С. 131.
2. Пинчук, В. В. Расчет присоединительных размеров компонентов агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроаппаратов технологических машин / В. В. Пинчук, А. В. Мархуленко, Д. Г. Ворочкин // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2013. – № 1. – С. 20–25.
3. Лисьев, В. П. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / В. П. Лисьев. – М. : Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики, 2006. – 199 с.

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

У. В. Клочко

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

Научный руководитель О. К. Абрамович

Рассмотрены принципы создания геологической модели, варианты возможного программного обеспечения и роль цифровых геологических моделей в разработке нефтяных и газовых месторождений.

Ключевые слова: цифровая геологическая модель, седиментационная модель, тектоническая модель, программные пакеты, ГИС, картографическое построение.

Геологическая модель – это сконцентрированная система знаний о геологическом объекте, согласованная с набором геолого-геофизических и промысловых данных, полученных к определенному моменту времени. Геологическая модель включает данные о тектоническом строении объекта, его геометрии, стратиграфии, литолого-фациальной характеристике пластов-коллекторов, об изменении их эффективных толщин и коллекторских свойств – пористости и проницаемости по площади

и разрезу, газонефтенасыщенности отдельных пропластков, гидрогеологической характеристике, величине запасов нефти и газа месторождения [1].

Геологическая модель пластов является фундаментальной основой для проектирования разработки нефтяных месторождений. Она позволяет понять строение залежи, свойства коллекторов и флюидов, а также спрогнозировать поведение пласта в процессе эксплуатации.

Геологическая модель состоит из двух основных частей: седиментационной модели и тектонической.

При создании седиментационной модели используются данные региональных и детальных геологических и геофизических съемок, а также описание и лабораторные исследования керна. Основную роль в разработке седиментационной модели помимо данных сейсморазведки играют данные каротажа, особенно при фациальном анализе. Наиболее эффективна совместная визуализация данных сеймики и геофизических исследований скважин (ГИС). При разработке седиментационной модели в качестве эталона используются результаты теоретических и практических исследований, выполненных для отложений данного типа в сходном по строению регионе. Адекватно построенная седиментационная модель обладает огромным прогностическим потенциалом, позволяя создать 3D геологическую модель даже в условиях ограниченного набора редкой сетки скважин. В настоящее время в наиболее цельном и законченном виде для построения седиментационной модели применяется методика сиквенс-стратиграфии, широко использующаяся по всему миру [2].

Для построения тектонической модели используются данные различного масштаба и методов различной физической природы: описания керна и обнажений, сейсмической интерпретации, магниторазведки, дистанционных методов и физического моделирования. На сегодняшний день определяющую роль в построении тектонической модели играют данные 3D сейсморазведки, позволяющие протрассировать и увязать в единую систему нарушения для каждого пласта в разрезе. На основе этой информации выполняется комплексный палеотектонический и тектонофизический анализ, позволяющий вместе получить целостную картину тектонического развития территории за геологическое время, оценить степень влияния нарушений друг на друга и на геологическую модель резервуара [3].

На некоторых месторождениях для оценки достоверности геологических моделей используются результаты бурения и методы кросс-валидации. Применяется и многовариантное геологическое и фильтрационное моделирование, когда на основе адаптации фильтрационной модели к истории разработки отбираются те варианты геологической модели, для которых гидродинамические модели оптимально согласуются с фактическими данными.

Данные, собранные из различных источников, загружаются в программный продукт моделирования, где создается новый рабочий проект. Большинство современных пакетов геологического моделирования, применяемые на Припятском прогибе (Petrel, IRAP RMS, Gocad), имеют файловую организационную структуру, например, для создания геологических моделей подсолевых карбонатных и терригенных залежей нефти Вишанского месторождения использовался программный комплекс Petrel («Schlumberger»). На базе созданных геологических моделей при помощи гидродинамического симулятора были сформированы фильтрационные модели рассматриваемых объектов разработки. При выборе размеров области построения геологической модели, в первую очередь, учитывалась история разработки и существующий режим эксплуатации моделируемого объекта. Важным условием является установление связи между нефтеносной и водоносной областями залежи, а также характера влияния законтурной

области и нагнетательных скважин на работу добывающего фонда. Определение размеров ячеек по латерали в большей степени зависело от плотности сетки добывающих скважин, изменчивости структурного плана и фильтрационно-емкостных свойств вмещающих пород. При определении размера блоков сетки по латерали особое внимание уделялось общему количеству ячеек в трехмерной модели, так как оно зависит от мощности используемой вычислительной техники. Ориентация блоков сетки была согласована с преимущественной ориентацией тектонических границ залежи. При вертикальном расчленении разреза на слои учитывалось условие, согласно которому каждому элементарному геологическому слою должна соответствовать минимум одна ячейка в модели по вертикали. Таким образом, удалось сохранить все, выделенные по ГИС, пропластки коллектора. В результате вертикального разбиения модели количество слоев составило 196, суммарное число ячеек в модели – 1575м056. В целях последующего гидродинамического моделирования данная модель была загружена при помощи модуля Upgridding Utility [4].

Исходная геологическая модель ланско-старооскольской залежи Вишанского месторождения содержит более 1 млн ячеек, что при имеющемся техническом оснащении не позволяет вести расчеты в гидродинамическом симуляторе. Поэтому для оптимизации времени расчета было проведено вертикальное перемасштабирование геологической модели при помощи модуля Upgridding Utility (программа Petrel). В качестве контролирующего свойства был использован куб литологии, при этом объединялись соседние слои, отличающиеся друг от друга не более чем на 5 %. Для описания распределения коллекторов и ФЕС в объеме залежи каждой ячейке в гидродинамической модели были присвоены значения литологии, пористости, насыщенности и проницаемости. Все эти параметры осреднены из исходной геологической модели посредством модуля Upgridding Utility, и средние значения ФЕС по моделируемому объекту остались неизменными. Геологические запасы составили на 2,2 % меньше, чем в исходной модели. Средний размер одной ячейки в модели в разрезе составил 2,31 м. Однако в перемасштабированной модели имеются слои около 0,4 м, описывающие все маломощные пропластки коллекторов, выделенные по ГИС.

Протяженность пластов (радиус влияния) в скважинах определялась путем сопоставления детальной корреляции разрезов скважин. Результаты интерпретации ГИС – характер насыщения (нефть, вода) и пористость, по пропласткам – формировались на основе обработки промыслово-геофизических данных по скважинам.

Контроль внесенной исходной информации осуществлялся путем сравнения материалов из базы данных и полученных в цифровой геологической модели. Для этого были построены гистограмм распределения, карты параметров и кросс-плотов в программном комплексе Petrel и сравнение их со значениями по скважинам и исходными картами.[5]

Множество публикаций в зарубежных и отечественных промышленных изданиях посвящены успешным проектам, в ходе которых на основании комплексирования высококачественных данных ГИС и 3D сейсморазведки, удается получить кубы литотипов и пористости продуктивных отложений, а в некоторых случаях даже моделировать насыщение ловушек.

Таким образом, цифровые геологические модели – это мощный инструмент для принятия решений, и они стали неотъемлемым инструментом в нефтегазовой отрасли. Их качество напрямую влияет на эффективность разведки и разработки месторождений. Современные технологии открывают новые возможности для создания более точных и детализированных моделей.

Литература

1. Современные проблемы геологического картирования : материалы X Унив. геол. чтений, Минск, 14–15 апр. 2016 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. И. Зуй (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 4–5.
2. Билибин, С. И. Технология создания и сопровождения трехмерных цифровых геологических моделей нефтегазовых месторождений: на основе интеграции данных петрофизики, ГИС и сейсморазведки : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.10 / Билибин Святослав Игоревич. – М., 2010. – 45 с.
3. Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 6 окт. 2022 г. – СПб., 2022.
4. Алешин, А. С. Цифровые модели в геологии нефти и газа / А. С. Алешин. – М. : Недра, 2015.
5. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования : учеб. пособие / К. В. Абабков, Д. Д. Сулейманов, Ш. Х. Султанов [и др.]. – Уфа : Нефтегаз. дело, 2010. – 199 с.

**ОПИСАНИЕ И СРАВНЕНИЕ ВИДОВ МНОГОСТАДИЙНОГО
ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТИ НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИН
БАРСУКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ**

А. А. Комарницкий

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

И. С. Шепелева, О. Л. Войтехин, К. В. Мироненко

РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

Рассмотрены особенности применения многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) для интенсификации добычи трудноизвлекаемых запасов на примере Барсуковского месторождения. Приведено описание различных технологических подходов к МГРП и их сравнительный анализ. Выделены преимущества технологии Plug & Perf, использованной на месторождении, а также полученные результаты по увеличению дебита и снижению обводненности продукции. Установлено, что применение МГРП позволило достичь начального дебита до 50 м³/сут при стабильной работе скважины в первые месяцы эксплуатации.

Ключевые слова: многостадийный гидроразрыв пласта, трудноизвлекаемые запасы, горизонтальная скважина, технология Plug & Perf, Барсуковское месторождение, интенсификация добычи, дебит скважины.

Многостадийный гидроразрыв пласта (МГРП) – это современный и высокоэффективный метод интенсификации добычи углеводородов, особенно в условиях плотных низкопроницаемых коллекторов. МГРП представляет собой последовательное проведение гидроразрыва в нескольких интервалах ствола скважины, применяется преимущественно в горизонтальных и наклонно-направленных скважинах.

Главные цели проведения МГРП заключаются в увеличении эффективной площади дренирования, повышении продуктивности и вовлечении в разработку ранее неосвоенных участков залежей. К задачам относятся: создание трещин в пласте, улучшение фильтрационных свойств призабойной зоны, равномерное распределение дебита по всему стволу, а также достижение экономической эффективности разработки месторождений.

Метод широко применяется в горизонтальных скважинах и зарекомендовал себя как один из ключевых инструментов для освоения трудноизвлекаемых запасов, особенно в зрелых, низкопроницаемых месторождениях.

К трудноизвлекаемым относятся запасы УВ, заключенные в пласты с низкой проницаемостью и насыщенностью, сложенные трещиноватыми, плотными и неоднородными породами. Они требуют применения методов интенсификации, таких как МГРП, для эффективного извлечения нефти.

Современная практика предусматривает несколько подходов к реализации многостадийного гидроразрыва пласта. Основными из них являются:

1. Шаровые многопортовые компоновки «Ball-Drop» – технология заключается в поэтапной обработке с использованием технологий гидроразрыва протяженной целевой зоны (либо разрозненных зон), оборудованной шаровой многопортовой компоновкой «Ball-Drop». Компоновка представляет собой незацементированный (либо зацементированный) сегмент хвостовой эксплуатационной колонны, оборудованный заколонными пакерами (для задания границ воздействия по стволу скважины в условиях отсутствия заколонной крепи) и активируемыми шарами механическими устройствами (портами для обеспечения гидравлической связи в системе «пласт – скважина»), при этом шары не только активируют последующие порты, но и механически отсекают ранее обработанные зоны. Для данного решения характерны высокие технико-технологические риски, критичность возникновения осложнений (особенно на ранних этапах), низкая прогнозируемость мест инициации трещин и их сравнительно небольшая плотность. Описанная технология затрудняет проведение повторной адресной стимуляции отдельных зон и не позволяет управлять профилем притока в процессе эксплуатации скважины.

2. Управляемые многопортовые компоновки – в отличие от технологии «Ball-Drop» используемая компоновка оборудована механическими устройствами (портами для обеспечения гидравлической связи в системе «пласт – скважина») активируемыми и деактивируемыми специальным ключом, спускаемым на гибкой трубе (первичная активация может осуществляться сбросом шаров). Для данного решения характерна низкая прогнозируемость мест инициации трещин и их сравнительно небольшая плотность. Теоретически метод позволяет выполнять обработку целевых зон в любой последовательности, обеспечивает адресность повторной стимуляции и при необходимости дает возможность выборочного выключения обработанных зон в работающей скважине, однако, как показывает практика, применяемое скважинное оборудование зачастую показывает неудовлетворительную надежность.

3. Технология «Plug & Perf» – технология заключается в поэтапной обработке с использованием технологий гидроразрыва протяженной целевой зоны (либо разрозненных зон) в обсаженных зацементированной эксплуатационной колонной скважинах. Конструкция скважины (и спускаемого лифта НКТ при его наличии) обеспечивает равнопроходное внутреннее сечение от устья до забоя. Обработка осуществляется циклично, каждый полный цикл включает следующие операции: перфорация целевой зоны (на геофизическом кабеле либо с использованием гибкой трубы), стимуляция по технологии гидроразрыва, отсечение обработанного интервала пробкой-отсекателем (на геофизическом кабеле либо с использованием гибкой трубы), при этом отсечение и перфорация осуществляются за одну спускоподъемную операцию. Количество полных циклов зависит от геолого-технических условий и стоящей геологической задачи. Использование геофизического кабеля (либо гибкой трубы) для комплекса подготовительных работ между стадиями позволяет существенно сократить время ГТМ и делает возможным выполнение операции за одну постановку флота ГРП. Данная технология позволяет управлять местом инициации трещин ГРП и их количеством, в конечном итоге обеспечивая плотность сети трещин гидроразрыва, недостижимую для других технологических решений.

Барсуковское нефтяное месторождение представляет собой зрелый актив с высокой степенью выработанности и сложно-коллекторским строением. Многостадийный гидроразрыв пласта на рассматриваемом применяется с 2020 г., начиная с 2023 г. МГРП реализуется по технологической схеме Plug&Perf: технология опробирована в трех скважинах с протяженностью горизонтальных интервалов освоения от 363 до 379 м, стадийность работ составила от 5 до 6 (всего 17 стадий), при этом обработано от 9 до 10 отдельных интервалов перфорации (всего 28 интервалов).

Технология Plug&perf обеспечила точную изоляцию интервалов и качественное вскрытие продуктивных зон. Благодаря применению этой технологии достигнут высокий контроль над качеством разрыва, а также увеличен охват ствола скважины стимулирующим воздействием.

Кроме того, процесс позволил оптимизировать потребление проппанта и жидкости, а также обеспечить равномерный приток по всей длине горизонтального ствола. Это привело к снижению риска раннего обводнения и увеличению добычного потенциала скважин. По результатам внедрения Plug&Perf МГРП на Барсуковском месторождении фактический вводный дебит по некоторым объектам достиг 50 т/сут, что в 3–4 раза превышает дебит объектов, осваиваемых без МГРП.

Общий прирост дебита по нефти на скважинах с Plug&perf МГРП составил более 100 т/сут. Это подтверждает эффективность метода Plug & Perf для геологических условий месторождения и оправдывает инвестиции в многостадийный гидроразрыв, особенно в условиях зрелых и низкопроницаемых пластов.

Проведенное исследование и анализ результатов применения различных технологий многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) на Барсуковском месторождении позволили сделать ряд важных выводов. Наиболее эффективной технологией в условиях зрелого, низкопроницаемого месторождения с усложненным коллекторским строением показала себя схема Plug & Perf. Ее применение обеспечило высокий уровень управляемости процессом разрыва, равномерный охват продуктивного интервала, снижение обводненности и значительный прирост добычи нефти.

Сравнительный анализ показал, что Plug & Perf имеет ряд технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими схемами МГРП, особенно в части качества вскрытия продуктивных пластов и возможности адресной стимуляции. Достигнутый прирост дебита до 50 т/сут и совокупное увеличение добычи более чем на 100 т/сут подтверждают целесообразность и эффективность инвестиций в данный метод.

Таким образом, технология Plug & Perf может быть рекомендована для широкого применения при разработке трудноизвлекаемых запасов на зрелых месторождениях с горизонтальными скважинами, где необходимы точность, управляемость и высокая результативность методов интенсификации добычи.

Л и т е р а т у р а

1. Порошин, В. В. Д. Разработка нефтяных и газовых месторождений : учеб. пособие / В. Д. Порошин, С. В. Козырева, С. Л. Порошина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – 399 с.
2. Шепелева, И. С. Промысловая геофизика : практикум по выполнению лаборатор. работ по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-51 02 02 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» днев. и заоч. форм обучения / И. С. Шепелева. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 54 с.
3. Классификатор технологий гидравлического разрыва пласта, применяемых в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». – М. : РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», 2020.

АНАЛИЗ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОМОТОРОВ ХОДОВОЙ ЧАСТИ КОМБАЙНА

Д. М. Янкович, Ю. А. Андреевец

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Произведен анализ способов регулирования частоты вращения валов гидромоторов. Определено, что применение LS-управления в гидросистеме комбайна позволяет автоматически поддерживать постоянной частоту вращения на гидромоторах при изменении нагрузки. На основе этого анализа был выбран оптимальный способ регулирования частоты вращения для валов гидромоторов и разработана гидросистема ходовой части початкоуборочного комбайна ES6.

Ключевые слова: гидросистема мобильной машины, гидропривод ходовой части, автоматизация изменения частоты вращения гидромотора, LS-управление.

Исполнительные органы ходовой части сельскохозяйственной техники должны иметь возможность движения с различными скоростями, определяемыми условиями работы, а также возможности автоматического переключения с транспортной на рабочую скорость движения. Спецификой ходовой части комбайна является возможность бесступенчатого регулирования скорости движения. Это обусловлено тем, что местность, в которой эксплуатируется комбайн, богата неровностями, уступами и другими помехами, которые вызывают перепады давления и дополнительную нагрузку на гидромоторы ходовой части.

Существует несколько типовых способов переключения частоты вращения гидромоторов в гидросистеме:

1. Объемное ступенчатое переключение с помощью двух гидронасосов (рис. 1, а). С двумя нерегулируемыми насосами можно получить четыре скорости в одну и в другую стороны, с тремя насосами – не менее восьми скоростей и т. д. Насосы Н1.1 и Н1.2 могут иметь одинаковые или разные рабочие объемы, разные скорости при этом обеспечиваются переключением распределителей Р1–Р3, реверс вращения вала гидромотора М и подачу жидкости к нему обеспечивает распределитель Р4 [1].

2. Объемное бесступенчатое регулирование скорости в зависимости от изменения давления в гидросистеме (рис. 1, б) [1]. Суть метода заключается в том, что возрастающая сила управления начинает изменять положение регулятора насоса, т. е. меняется рабочий объем насоса и его подача. Управление гидросистемой осуществляется от электронной системы 1–3, которой осуществляют регулировку пропорциональным дросселем Др (поддерживается постоянный расход и частота вращения на гидромоторе); настройку допустимого давления на клапане предохранительном КПЗ (допустимое давление на гидромоторе); настройку пропорционального клапана КП6 (изменяется давление управления на регуляторе гидромотора и изменяется его частота вращения).

3. LS-система управления. Благодаря использованию гидрораспределителей и гидронасосов, работающих на принципе Load sensing, становится возможным выполнять задачи автоматического регулирования расхода рабочей жидкости, поступающей к гидромоторам (рис. 1, в) [2]. В данной системе применяется насос с LS-система управления рабочим объемом. При увеличении крутящего момента (нагрузки)

на одном из моторов М1 или М2, изменяется давление в напорных линиях до дросселей Др1 или Др2 соответственно, регулятор насоса автоматически изменяет рабочий объем насоса пока не восстановится равенство давлений. При этом к менее нагруженному гидромотору поступает меньший расход и давление в его напорной линии не влияет на регулятор насоса, так как линия управления перекрыта клапаном «ИЛИ». Таким образом, система обеспечивает подачу жидкости в более нагруженный гидромотор, увеличивая проходимость мобильной машины.

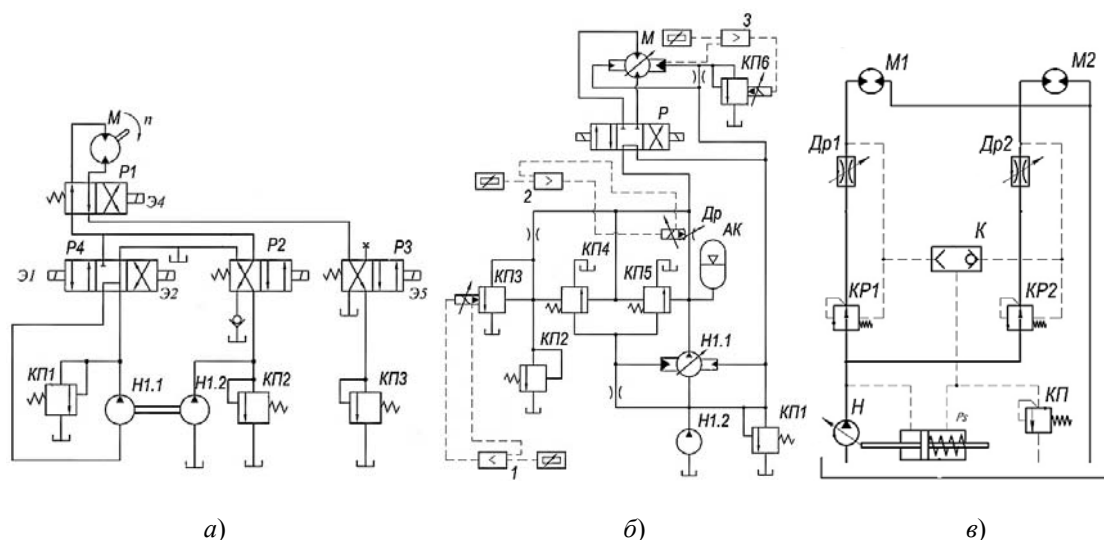


Рис. 1. Схемы регулирования частоты вращения:

- а – регулирование с использованием пропорциональной гидроаппаратуры;
- б – ступенчатое регулирование с помощью стандартных гидрораспределителей,
- в – применение LS-системы в гидроприводе передних колес мобильной машины

Особенностью LS-систем является то, что позиция основного гидрораспределителя всегда пропорциональна величине расхода при любых рабочих условиях, независимо от давления, действующего со стороны гидродвигателя или величины подаваемого расхода, т. е. скорость нескольких гидродвигателей, действующих одновременно, сохраняется постоянной независимо от изменения давления в гидросистеме [3]. Гидравлические системы с адаптацией к нагрузке (LS-системы) решают основную проблему увеличенных потерь мощности в гидросистеме за счет того, что входное давление гидросистемы изменяется в соответствии с изменением давления на наиболее нагруженном исполнительном органе, превышая его на небольшую постоянную величину.

Ходовая часть початкоуборочного комбайна должна иметь гидропривод переднего и заднего мостов, поэтому оптимальным схмотехническим решением является применение LS-системы управления для обеспечения максимального КПД и эффективности работы, а также увеличенной проходимости по слабым грунтам.

Схема гидропривода ходовой части початкоуборочного комбайна с LS-системой управления представлена на рис. 2. Система включает тандем-насос Н1.1, что питает моторы колес переднего и заднего моста. Также система включает в себя объединенный гидроблок подключения управляемого моста ГБ1.1 и гидроблок блокировки управляемого моста ГБ1.2. Управление мотором М1.1 переднего моста осуществляется трехпозиционным распределителем Р 2.1. При нормальной работе распределитель находится в среднем положении, однако если в одной из линий гид-

ромотора повышается давление, то жидкость подается по линии управления распределителю, смещая его в крайнее положение. Это позволяет сливать жидкость на выходе из мотора через клапан предохранительный КП. Система позволяет включать и отключать при необходимости блокировку управляемого моста. При правом положении Р1.1 рабочая жидкость минует задний мост. Но при подаче сигнала на электромагнит Y 1.2 распределитель Р1.1 смещается в левое положение, что позволяет рабочей жидкости сместить распределитель Р1.2 в левое положение и открыть путь в гидроблок ГБ1.1 (блокировка заднего моста). Рабочая жидкость через гидроблок ГБ1.1 питает мотор-колеса МК1.1 и МК1.2. В обычном положении рабочая жидкость поступает к моторам в одинаковом объеме, но, чтобы преодолеть препятствие своем пути (при этом повышается момент сопротивления, и, следовательно, давление в этой линии), распределители гидроблока ГБ1.1 позволяют отдать приоритет на одно из колес. Это дает возможность получить одному из колес необходимый объем рабочей жидкости для преодоления препятствия, одновременно тем самым как бы «заимствуя» объем рабочей жидкости у другого колеса.

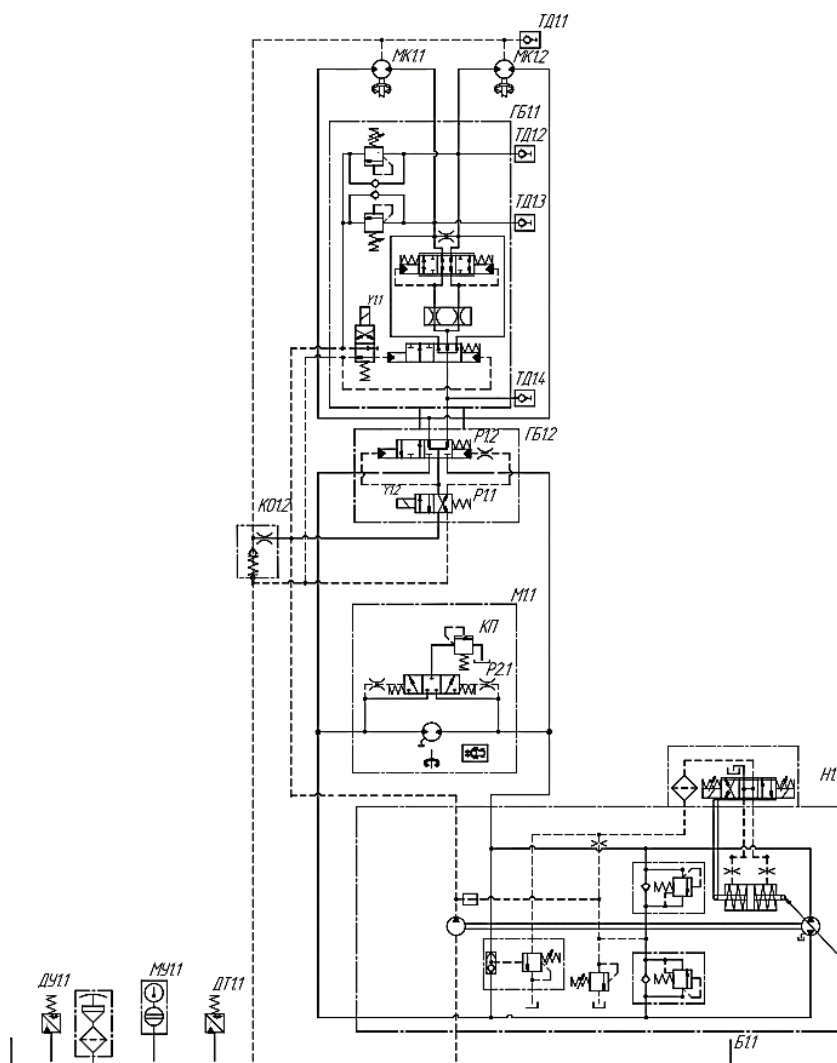


Рис. 2. Применение LS-системы в гидроприводе ходовой части початкоуборочного комбайна

Таким образом, LS-система позволяет сохранять постоянной скорость гидродвигателей, действующих одновременно, независимо от изменения давления в гидросистеме, что повышает эффективность работы и КПД гидропривода в целом.

Литература

1. Гидравлика и гидропневмопривод : учеб. пособие / П. Я. Крауиньш, С. А. Смайлов, Б. Б. Мойзес ; Том. политехн. ун-т, Ин-т дистанцион. образования. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006. – 223 с.
2. Шабалин, Р. А. К вопросу использования гидропривода передних колес транспортно-технологических машин с целью повышения проходимости / Р. А. Шабалин, К. А. Асанбеков // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта : IV Всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 2023 г. / Урал. ун-т. – Екатеринбург, 2023. – С. 77–80.
3. Гинзбург, А. А. Анализ потерь мощности гидросистем с клапанной и объемной адаптацией к нагрузке при равномерном распределении расхода / А. А. Гинзбург, Ю. А. Андреев // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Таиз. ун-т ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 58–61.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОСИСТЕМ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ GS12A1 PRO И GS12A1

М. О. Прядко

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

Научный руководитель Ю. А. Андреев

Произведено сравнение конструктивных особенностей и эксплуатационных характеристик зерноуборочных комбайнов GS12A1 (с передним приводом) и GS12A1 PRO (с полным приводом), производимых ОАО «Гомсельмаш» по нескольким критериям: простота гидросистемы и влияние типа привода на производительность. Отмечено, что результаты исследования позволяют объективно оценить преимущества и недостатки каждой системы привода для различных условий эксплуатации и потребностей сельскохозяйственных предприятий.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн GS12A1, ОАО «Гомсельмаш», комбайн GS12A1 PRO, передний привод, полный привод, гидравлическая система.

Современное сельское хозяйство предъявляет высокие требования к эффективности и надежности сельскохозяйственной техники. Зерноуборочные комбайны, являясь ключевым звеном в процессе уборки урожая, постоянно совершенствуются. Выбор между комбайнами с передним и полным приводом – одно из важнейших решений для сельхозпроизводителей, так как напрямую влияет на экономическую эффективность и производительность работ. ОАО «Гомсельмаш», один из ведущих производителей сельхозтехники, предлагает модели комбайнов GS12A1 и GS12A1 PRO, представляющие собой яркий пример сравнения двух различных концепций привода.

Комбайн зерноуборочный самоходный GS12A1 PRO с передним приводом (рис. 1), имеет сравнительно простую гидравлическую систему для управления ходовой частью [1].

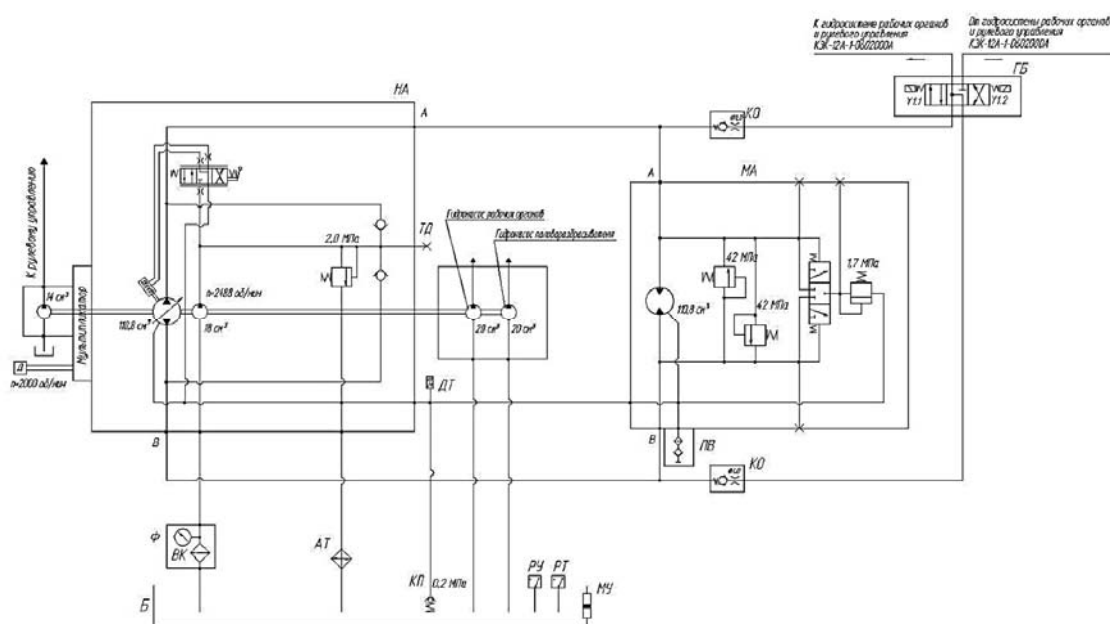


Рис. 1. Схема гидравлическая принципиальная гидросистемы привода ходовой части зерноуборочного комбайна GS12A1 PRO

Данная гидросистема относится к двухпоточной, гидродифференциальной, в которой происходит разделение единого потока мощности на две параллельные ветви – гидравлическую и механическую, которые затем вновь соединяются. От вала двигателя внутреннего сгорания поток мощности поступает на механическую коробку передач, где происходит его разделение и один поток энергии поступает в механический дифференциально-планетарный редуктор, а другой поток – в блок гидрообъемной передачи, состоящий из регулируемых объемных насоса НА и гидромотора МА. Затем оба потока объединяются на выходном валу и увеличенный поток мощности поступает на вал трансмиссии комбайна. При этом основная нагрузка ложится на переднюю ось комбайна, что упрощает конструкцию и снижает стоимость. Тандем-насос гидравлической системы также питает гидросистему рулевого управления и торможения. Изменение скорости движения комбайна и реверсирование осуществляется изменением подачи насосного агрегата и направления потока жидкости при переключении механической коробки передач, установленной после двигателя.

В данной гидросистеме регулируемый насос НА и нерегулируемый мотор МА, соединяются трубопроводами, давление в которых ограничивается предохранительными клапанами, входящими в состав гидромотора и настроенными на максимальное рабочее давление 42 МПа. Регулирование подачи насоса осуществляется изменением угла наклона диска аксиально-поршневого насоса при помощи гидроцилиндра управления. Управление гидроцилиндром осуществляется водителем комбайна с переключения распределителя насоса с ручным управлением.

Система подпитки (насос с рабочим объемом 18 см³) обеспечивает постоянное количество рабочей жидкости, циркулирующей между насосом НА и гидромотором МА, а следовательно и постоянную частоту вращения на валу гидромотора. Поэтому в данной гидросистеме поток мощности от двигателя является постоянным, но при движении по неровным участкам поля мощность на выходе гидростатической трансмиссии может изменяться, что снижает общий КПД привода.

Литература

1. ЗЕРНОУБОРОЧНЫЙ КОМБАЙН GS12A1 PRO : рук-во по эксплуатации. – URL: https://gomselmash.by/upload/iblock/0c9/kzk_12a_1_0000000aie_manual.pdf (дата обращения: 05.04.2025).
2. ЗЕРНОУБОРОЧНЫЙ КОМБАЙН GS12A1 : рук-во по эксплуатации. – URL: https://gomselmash.by/upload/iblock/025/1si9she279yjowjxcck388w68ilsjmerh/manual_kzk_2_12_0100000_03_2025.pdf (дата обращения: 05.04.2025).

АНАЛИЗ СИСТЕМ КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПРИ РАБОТЕ ЖАТКИ

В. В. Лапотко, Ю. А. Андреевец

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

Научный руководитель В. В. Пинчук

Рассмотрены конструктивные варианты систем копирования поверхности поля, изучены схемные решения гидросистем копирования, применяемых в сельскохозяйственной технике, в том числе и на ОАО «Гомсельмаш», их достоинства и недостатки, в результате разработан гидропривод гибкого режущего аппарата жатки транспортной универсальной.

Ключевые слова: система копирования рельефа, система уравнивания «пнеumo-гидроаккумулятор – гидроцилиндр», сельскохозяйственная машина, жатка транспортная.

Копирование рельефа при эксплуатации сельскохозяйственных и других типов мобильных машин заключается в обеспечении их эффективной работы на неровных поверхностях. Это достигается за счет создания и совершенствования систем, которые позволяют технике адаптироваться к особенностям рельефа.

Все разнообразие систем копирования рельефа поля можно разделить на три большие группы: пассивные, активные и гибридные [1–3] (рис. 1).

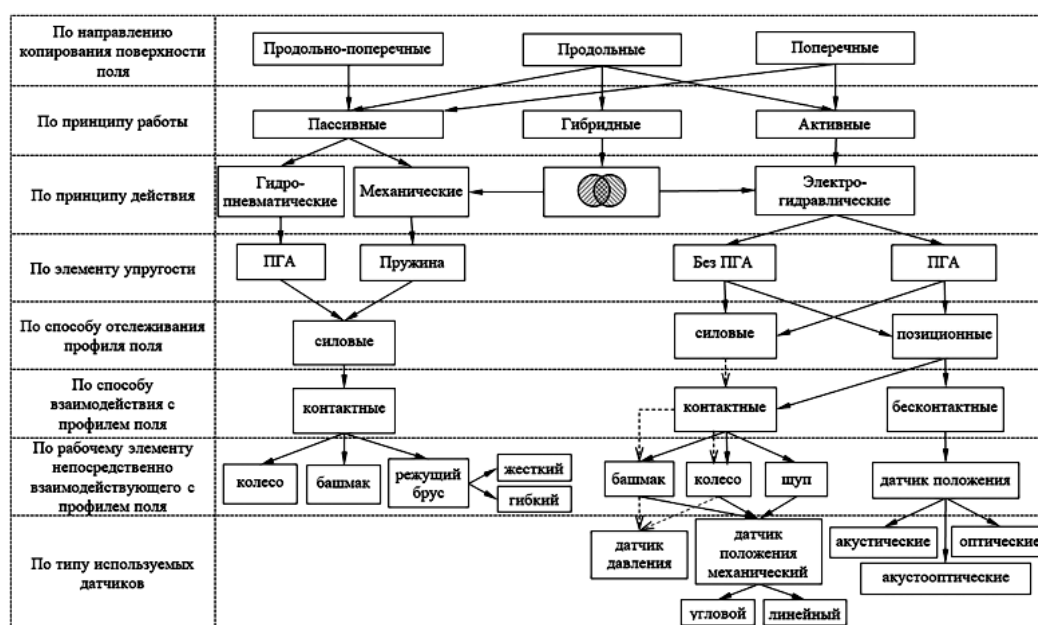


Рис. 1. Схема классификации систем копирования

К пассивным системам копирования можно отнести системы, у которых отсутствует управление параметрами, влияющими на высотное регулирование, в процессе работы. В таких системах механизм настраивается один раз перед работой и во время копирования рельефа поля не проводится перенастройка его параметров под изменяющиеся условия работы. Такие системы могут быть как механического типа, с использованием пружинно-рычажных механизмов, так и гидравлического, с использованием замкнутого контура «гидроцилиндр – пневмогидроаккумулятор». В этом случае пневмогидроаккумулятор совместно с гидроцилиндром выполняет роль упругого элемента (рис. 2).

В активных гидросистемах копирования рельефа поля применяется электрогидравлическое управление системой чувствительной к изменению нагрузки на выходной звене. В таких гидросистемах обеспечивается постоянный подпор в рабочей полости гидроцилиндра при регулировании нагнетания рабочей среды электрогидравлическим блоком управления.

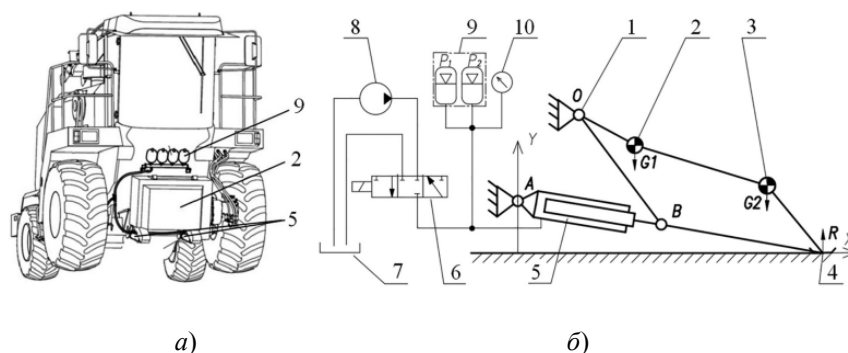


Рис. 2. Кормоуборочный комбайн с пассивной системой копирования гидравлического типа:

a – общий вид сзади; *б* – принципиальная схема; 1 – ось качания навески совместно с адаптером; 2 – точка G_1 – центр тяжести навески; 3 – точка G_2 – центр тяжести адаптера; 4 – точка R – опорный элемент адаптера; 5 – гидроцилиндр; 6 – гидрораспределитель; 7 – гидробак; 8 – гидронасос; 9 – блок пневмогидроаккумуляторов; 10 – датчик давления

К гибридным системам относятся системы, у которых в малом диапазоне копирования рельефа поля работает механическая система, а при выходе из этого диапазона – работает активная электрогидравлическая система. Как правило, с помощью активной электрогидравлической системы происходит перевод механической системы в новую зону работы на уровне макрорельефа.

Пассивные системы копирования — исторически первая группа систем уравнивания. Они хорошо себя зарекомендовали в узком диапазоне копирования, но эти системы не могут автоматически перенастраиваться под резкие изменения высоты профиля поля. Применение активных систем копирования предполагает автоматизацию высотного регулирования рабочих органов с помощью различных средств и позволяет автоматизировать и управлять процессом копирования непрерывно в ходе работы. Однако и эти системы не лишены недостатков, один из которых – ограничение быстродействия на скоростях движения выше 6 км/ч. Гибридные системы копирования совмещают положительные качества первых двух групп и обеспечивают работоспособность системы копирования сельскохозяйственных машин на повышенных скоростях.

На основании гибридных гидросистем автоматического копирования поверхности поля, которые разработаны и используются в комбайнах и косилках производства НТЦК ОАО «Гомсельмаш» [4], разработана принципиальная схема гидропривода режущего аппарата жатки транспортной универсальной (рис. 3). Жатка агрегируется с комбайном КЗК-2124 и предназначена для уборки зерновых колосовых культур, рапса и сои на равнинных полях с уклоном до 8° . Гидросистема жатки должна обеспечивать при эксплуатации копирование режущего аппарата по носкам сегментов относительно рамы жатки, копирование в продольном направлении по носкам сегментов режущего аппарата и копирование в поперечном направлении по носкам крайних сегментов режущего аппарата.

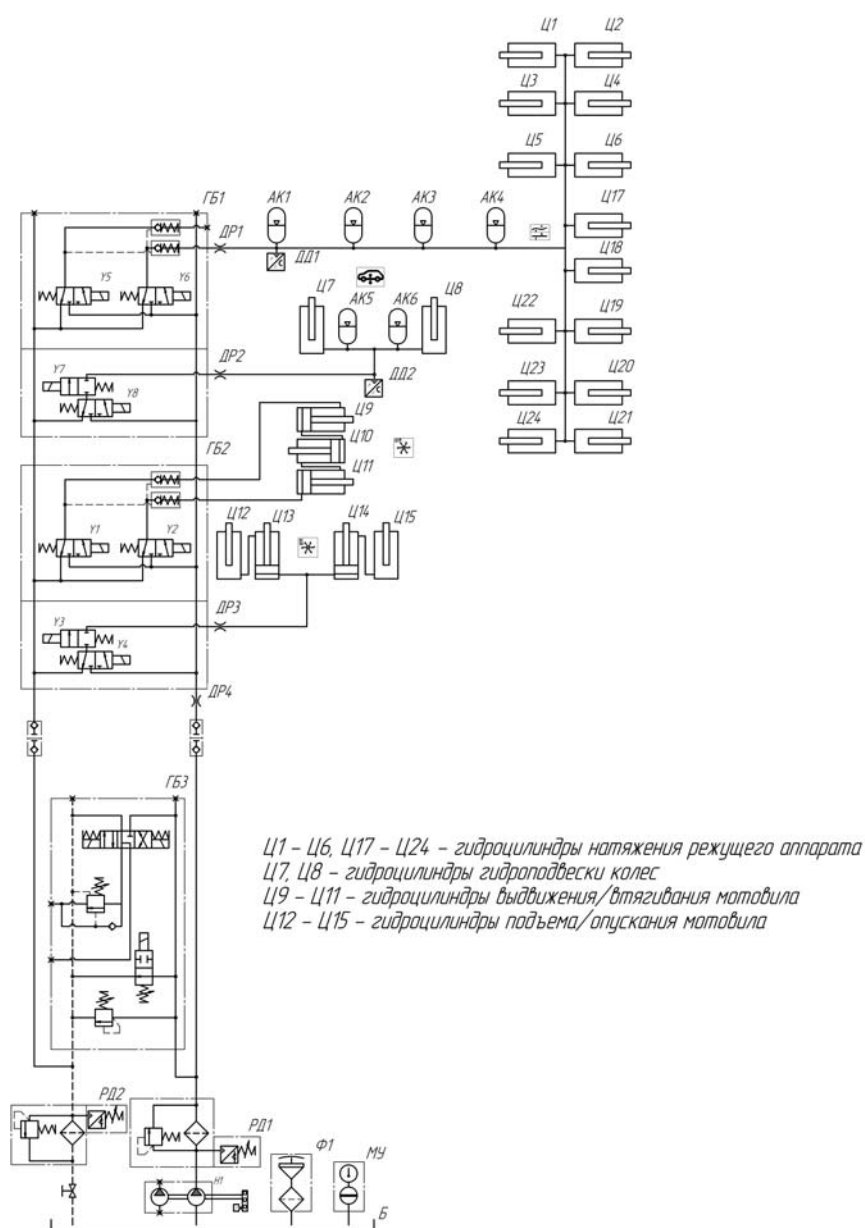


Рис. 3. Гидропривод гибкого режущего аппарата жатки транспортной

Режущий аппарат жатки сегментно–пальцевого типа представляет собой гибкий брус, к которому крепятся ножи. Подъем и опускание бруса с режущим аппаратом обеспечивается цилиндрами Ц1-Ц6, Ц17-24. Копирование рельефа при движении по полю обеспечивается поддержанием давления в гидроцилиндрах с помощью пневмогидроаккумуляторов. Изменение высоты неровностей поверхности поля приводит к изменению нагрузки на опорном элементе режущего аппарата, которая, в свою очередь, ведет к изменению давления в полостях гидроцилиндров. Датчик давления ДД1 формирует сигнал, который сравнивается в регуляторе с задающим воздействием, и создает принудительное управляющее воздействие на гидроцилиндры при помощи гидроблока ГБ1. В случае увеличения давления происходит нагнетание рабочей жидкости в гидроцилиндры – режущий аппарат поднимается. В случае снижения давления происходит слив рабочей жидкости из гидроцилиндров под действием сил тяжести – режущий аппарат опускается. Отслеживание рельефа при этом производится автоматически, аналогично следящим системам копирования, что увеличивает быстродействие системы и позволяет комбайну работать без потерь на скоростях движения выше 6 км/ч.

Проведен обзор различных систем копирования поверхности поля, применяемых в конструкциях сельскохозяйственных уборочных машин, изучены типовые схемные решения, используемые в технике НТЦК ОАО «Гомсельмаш», и разработана схема гидропривода гибкого режущего аппарата жатки транспортерной. Разработанная система позволяет автоматически изменять положение отдельных частей режущего аппарата и осуществлять плавающее движение бруса для отслеживания рельефа поля за счет применения в составе гидропривода пневмогидроаккумуляторов.

Л и т е р а т у р а

1. Долгов, И. А. Уборочные сельскохозяйственные машины. (Конструкция, теория, расчет) : учебник / И. А. Долгов. – Ростов-н/Д : ИЦ ДГТУ, 2003. – 707 с.
2. Устинов, А. Н. Зерноуборочные машины : учеб. для начал. проф. образования / А. Н. Устинов. – М. : Академия, 2003. – 128 с.
3. Ларюшин, Н. П. Сельскохозяйственные машины : учеб. пособие / Н. П. Ларюшин. – Пенза : РИО ПГСХА, 2011. – 243 с.
4. Рехлицкий, О. В. Математическое описание системы уравнивания адаптеров мобильной кормоуборочной машины с применением пневмогидроаккумулятора / О. В. Рехлицкий, Ю. В. Чупрынин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 1 (26). – С. 40–48.

СЕКЦИЯ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ВЫПУСКАЕМОГО МЕТАЛЛОКОРДА

О. Ю. Ходосовская

*Открытое акционерное общество «Белорусский
металлургический завод» – управляющая компания
холдинга «Белорусская металлургическая компания», г. Жлобин*

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Отмечено, что на мировом рынке одной из актуальных тенденций является использование в шинах металлокорда более высокой прочности. Тенденция уже прочно укрепилась на европейском рынке и набирает популярность в странах ЕАЭС. Стремление к развитию производства высокопрочной проволоки и изготовленного из нее металлокорда обусловлено не только экономическими, но и экологическими требованиями к продукции автомобильной промышленности. Многолетний опыт работы в области производства металлокорда позволил разработать технологию изготовления сверх- и ультравысокопрочного металлокорда для легковых и легкогрузовых шин. Дальнейшее повышение прочности выпускаемого металлокорда позволит расширить сортамент и освоить новые виды конкурентоспособной продукции. Определено, что для этого требуется решить ряд вопросов, связанных как с модернизацией или обновлением оборудования, так и с необходимостью использования новых материалов и усовершенствованных технологических режимов.

Ключевые слова: технология, волочение, свивка, микролегирование, тенденции.

Металлокорд представляет собой витое изделие, состоящее из нескольких проволок, каждая из которых оказывает влияние на свойства конечного продукта, и используется для армирования шин. Производство металлокорда тесно связано с развитием автомобильной промышленности. Стремление к развитию производства мегавысокопрочной проволоки и изготовленного из нее металлокорда связано не только экономическими, но и экологическими требованиями к продукции автомобильной промышленности. Повышение прочности металлокорда позволит увеличить время жизни шин, уменьшить их потребление и соответственно уменьшить влияние на экологию. Развитие данного направления дает возможность расширить линейку групп прочности металлокорда и освоить новые виды конкурентоспособной продукции. Ряд мировых производителей приступил к разработке шин, с использованием металлокорда, изготовленного из стальной латунированной проволоки с прочностью 4100 МПа, а в некоторых случаях – до 4800 МПа [1]. Поскольку практически все разработки в данном направлении можно отнести к секретам производства («ноу-хау»), приходится искать пути достижения повышения прочности выпускаемого металлокорда, исходя из возможностей имеющегося в распоряжении оборудования.

Цель работы – определение основных направлений исследований для совершенствования и разработки технологий производства мегавысокопрочного металлокорда.

Среди возможных путей повышения прочности металлокорда можно выделить следующие:

- увеличение углеродного эквивалента в исходной катанке;
- применение микролегирования;
- повышение чистоты стали;
- совершенствование режимов волочения проволоки и свивки металлокорда с целью поиска технологической возможности более интенсивного деформационного упрочнения стали без повышения содержания углерода.

Существует ряд факторов, сдерживающих повышение прочности металлокорда:

- увеличение углеродного эквивалента в исходной катанке способствует возрастанию уровня ликваций, что, в свою очередь, может стать причиной появления структурно-свободного цементита в процессе патентирования. Кроме того, из-за увеличения содержания углерода происходит возрастание динамического деформационного старения, приводящего к потере пластичности поверхностных слоев проволоки;

- микролегирование переходными металлами замедляет процесс патентирования, что приводит к снижению производительности процесса;

- обеспечение повышенной чистоты стали, полученной электродуговой плавкой с шихтой преимущественно из металлолома, проблематично;

- использование термодиффузионных установок, предназначенных для нагрева проволоки после нанесения медного и цинкового покрытия с целью получения сплава – латуни, в результате взаимной диффузии меди и цинка снижает прочность проволоки;

- увеличение суммарной деформации, необходимой для получения уравновешенного высокопрочного металлокорда, зачастую приводит к росту обрывов в процессе свивки. И, как следствие, может потребоваться снижение скоростей волочения стальной латунированной проволоки и свивки металлокорда, что также окажет отрицательное влияние на производительность процесса;

- увеличение прочности стальной латунированной проволоки ведет к увеличению упругости материала, что может отрицательно сказаться на прямолинейности и нераскручиваемости металлокорда.

Несмотря на сложность и многофакторность процесса изготовления мегапрочного металлокорда, из литературных источников [2–4] известно, что достижение высокого уровня прочности тонкой проволоки в сочетании с достаточной пластичностью возможно с использованием катанки с высоким содержанием углерода и легирующих элементов. Высокоуглеродистая сталь с содержанием углерода 0,90 % после тонкого волочения достигает прочности при растяжении более 4000 МПа.

В работах, проводимых на предприятии, находят отражение новые мировые тенденции в области разработки перспективных конструкций шин и металлокорда для них, что проявляется в постоянно расширяющемся списке конструкций, которые производятся или могут быть произведены на существующем оборудовании, а также улучшении эксплуатационных свойств выпускаемой продукции. Освоение технологического процесса изготовления металлокорда в условиях предприятия началось с изготовления тонкой латунированной проволоки диаметрами от 0,15 до 0,265 мм из стали марки 70К. Дальнейшее развитие данного направления позволило расширить сортамент и освоить новые виды конкурентоспособной продукции, в том числе сверх- и ультравысокопрочной проволоки, из которой изготавливается металлокорд для легковых и легкогрузовых шин [5–23]. Внедрение мегавысокопрочных конструкций металлокорда в промышленных объемах требует не только совершенно нового уровня технологической дисциплины, но и предъявляет новые требования к исходным материалам и используемому для производства оборудованию.

Проведенный литературно-патентный анализ [1–30] показал, насколько возрос интерес к области разработки конструкций шин с использованием мегавысокопрочного металлокорда. Систематизированные и обобщенные данные, полученные в процессе изучения вопроса повышения прочности металлокорда в условиях отечественного производства, определили сдерживающие факторы и основные направления исследований для совершенствования и разработки технологий производства мегавысокопрочного металлокорда. Определено, что исследования будут направлены на использование для металлокорда стали, микролегированной хромом с содержанием углерода 0,80–0,90 %, на условия повышения чистоты стали и совершенствовании режимов волочения проволоки, а также режимов свивки металлокорда.

Литература

1. Веденеев, А. В. Новые направления в развитии металлокорда / А. В. Веденеев // Литье и металлургия. – 2004. – № 3 (31). – С. 162–165.
2. Kazuhiko, K. Production Technology of Wire Rod for High Tensile Strength Steel Cord / K. Kazuhiko // Wire Rod Production Department, Kakogawa Works, Iron & Steel Business Kobelco technology review. – 2011. – Dec. – N 30.
3. Daition, V. Микроструктура сильнодеформированной высокоуглеродистой проволоки = Microstructures of heavily deformed high carbon steel wires / V. Daition, T. Hamada // Tetsu to hagane = Journal of Iron and Steel Institute of Japan. – 2000. – Vol. 86, N 2. – С. 105–110.
4. Бобарикин, Ю. Л. Перспективные направления совершенствования метизного производства в Республике Беларусь / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартыанов // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. тр. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Ун-т им. Аджинкья Д. Я. Патила ; под ред. М. Н. Андриянчиковой. – Гомель, 2023. – С. 138–140.
5. Lings, K. High-strength wire rod for tire cord applications / K. Lings // Tire technology international. – 2006. – P. 112–114.
6. Куренкова, Т. П. Анализ возможных причин образования зернистого цементита в структуре проволоки из высокоуглеродистой стали в условиях метизного производства РУП «БМЗ» / Т. П. Куренкова, И. В. Борисовец // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С. 84–88.
7. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние в проволоке из высокоуглеродистой стали / М. Н. Верещагин, Ю. Л. Бобарикин, А. Н. Савенок [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – № 1. – С. 40–48.
8. Маточкин, В. А. Особенности термической обработки и подготовки поверхности высокоуглеродистой катанки-проволоки при волочении / В. А. Маточкин // Металлургия и литейное производство 2007 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, май 2007 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – С. 45–48.
9. Савенок, А. Н. 20 лет метизному производству белорусского «индустриального гиганта» / А. Н. Савенок, А. В. Веденеев // Литье и металлургия. – 2007. – № 4. – С. 24–28.
10. Андрианов, Н. В. Производство металлокорда в Беларуси / Н. В. Андрианов, А. Н. Савенок, Ю. Л. Худoley // Металлургия и литейное производство 2007 Беларусь : материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 2007 г. – С. 27–32.
11. Веденеев, А. В. Современные тенденции развития оборудования для свивки металлокорда / А. В. Веденеев, В. С. Панизович // Литье и металлургия. – 2005. – № 4 (36). – С. 81–85.
12. Савенок, А. Н. Новые направления развития производства металлокорда / А. Н. Савенок, А. В. Веденеев // Сталь. – 2004. – № 10. – С. 89–91.
13. Влияние неметаллических включений на обрывность проволоки при свивке металлокорда / С. А. Исаков, Л. А. Бердикулова, Т. М. Кудрявцева, Д. С. Лучшева // Сталь. – 2002. – № 10. – С. 34–37.
14. Катильков, Г. Н. Сверхвысокопрочная латунированная проволока для рукавов высокого давления / Г. Н. Катильков // Литье и металлургия. – 2005. – № 3 (35). – С. 107–108.
15. Веденеев, А. В. Модернизация канатной машины для производства металлокорда / А. В. Веденеев, А. Н. Пушков, С. Б. Никитин // Металлургия XXI века : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 2004.
16. Игнатенко, О. И. Влияние распределения частных деформаций и величины рабочих углов волок на характеристики тонкой высокопрочной проволоки / О. И. Игнатенко, А. С. Желтков // Металлургия XXI века : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 2004.

17. Фетисов, В. П. Структурные аспекты снижения пластичности высокопрочной проволоки при больших суммарных обжатиях / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. – 2012. – № 4 (68). – С. 107–109.
18. Фетисов, В. П. Влияние технологии свивки методом двойного кручения на формирование остаточных кручений и прямолинейности металлокорда / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. – 2012. – № 4 (68). – С. 45–47.
19. Евдонич, В. А. Исследование влияния применения сдвоенной чистовой волоки на пластические свойства стальной высокоуглеродистой проволоки / В. А. Евдонич, Ю. Л. Бобарикин, Т. А. Ахметов // Литье и металлургия. – 2019. – № 3. – С. 113–117.
20. Ковалева, И. А. Особенности формирования закалочных структур в высокоуглеродистой катанке диаметром 5,5 мм / И. А. Ковалева, Н. А. Ходосовская, А. А. Кучкоч // Литейное производство и металлургия 2019, Беларусь : материалы Междунар. науч.-техн. конф, 2019. С. 151–153.
21. Бирюков, Б. А. Снижение обрывности высокопрочной проволоки при свивке металлокорда на машинах двойного кручения / Б. А. Бирюков, Ю. В. Феоктистов, А. В. Веденеев // Черные металлы. – 2012. – С. 37–43.
22. Демидов, А. В. Опыт модернизации станков мокрого волочения проволоки для металлокорда / А. В. Демидов, И. А. Муравейко // Литье и металлургия. – 2018. – № 4 (93). – С. 97–102.
23. Температурно-деформационный критерий оптимизации маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, А. В. Веденеев, И. Н. Радькова // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 205–208.
24. Борисовец, И. В. Дефекты латунного покрытия и их влияние на качество тонкой латунированной проволоки / И. В. Борисовец, В. И. Возная, А. А. Сахарная // Литье и металлургия. – 2013. – № 3 (72). – С. 192–198.
25. Серегина, Е. С. Обрывность проволоки во время волочения по причинам наличия поверхностных дефектов, наследованных с катанки / Е. С. Серегина // Литье и металлургия. – 2017. – № 4 (89). – С. 26–31.
26. Игнатенко, О. И. Эффективность использования сталей, микролегированных хромом, в мезином производстве в условиях РУП «БМЗ» / О. И. Игнатенко, Е. В. Шамановская // Литье и металлургия. – 2008. – № 3 (47). – С. 89–91.
27. Заявка RU 0002695847. Высокопрочная стальная проволока / Mesplont C., Tempelaere G, Van Haver W., De Clercq M. : опубл. 28.02.2019.
28. Патент BY 6035. Способ изготовления высокопрочной стальной проволоки / Желтков А. С., Савенок А. Н., Ежов В. В., Филиппов В. В. : опубл. 30.03.2004.
29. Патент BY 6487. Способ изготовления высокопрочной стальной проволоки с повышенной пластичностью при скручивании / Желтков А. С., Филиппов В. В. : опубл. 30.09.2004.
30. Столяров, А. Ю. Разработка конкурентоспособной технологии производства проволоки высокой прочности для армирования автомобильных шин : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.05 / Столяров Алексей Юрьевич ; Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2013. – 16 с.

ВЛИЯНИЕ ТИПА И РАЗМЕРА СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СВИВКИ МЕТАЛЛОКОРДА

Д. С. Чубарев

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

Научный руководитель Ю. В. Мартянов

Рассмотрены различные виды сеток конечных элементов для численного моделирования. Определены типы сеток, применяемые для моделирования свивки металлокорда. Проведен сравнительный анализ влияния размера сетки на точность расчетов.

Ключевые слова: металлокорд, моделирование, сетка, конечный элемент.

Типы сетки конечных элементов играют важную роль в точности и эффективности моделирования различных процессов, включая свивку металлокорда. В зависимости от сложности модели и необходимости получения высокой точности расчетов используют различные типы сеток конечных элементов. Тетраэдрическая сетка: состоит из тетраэдров и применяется для моделирования сложных геометрических форм. Она хорошо подходит для задач, где требуется высокая гибкость и возможность адаптации к сложной топологии. Гексаэдрическая сетка: состоит из гексаэдров и применяется в тех случаях, когда требуется высокая точность и стабильность расчетов, например, в структурных анализах и моделировании текучих сред. Призматическая сетка: сочетает в себе свойства тетраэдрической и гексаэдрической сеток и используется для моделирования геометрий с вытянутыми формами, таких, как трубы и балки. Комбинированные сетки: объединяют различные типы элементов, что позволяет оптимизировать расчетные ресурсы и повысить точность моделирования в сложных задачах. Комбинированные сетки широко применяются в мультифизических моделях. Для трубных заготовок используют специализированную сетку Tubemesh в полярных и цилиндрических координатах. Дополнительно для двумерных моделей используют квадратную сетку (Quad), треугольную равнобедренную сетку (Tris).

Каждый тип сетки конечных элементов имеет свои преимущества и ограничения, и выбор того или иного типа зависит от конкретной задачи моделирования, требований к точности и доступных вычислительных ресурсов [1].

Для свивки металлокорда наиболее предпочтительно использовать гексагональную или тетраэдрическую сетку в связи с необходимостью перехода из цилиндрической формы в спиральную объемную форму. При этом в некоторых случаях проволока деформируется значительно. Пример численной модели свивки металлокорда представлен на рис. 1.

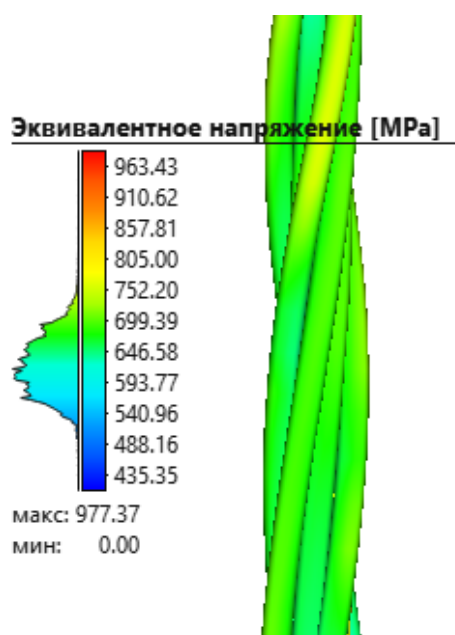


Рис. 1. Пример свивки металлокорда

Для достижения высокой точности расчетов необходимо тщательно подбирать размер конечного элемента. Проведен сравнительный анализ влияния величины сетки конечных элементов на точность получаемых результатов. Для этого построена двумерная модель осадки полосы ограниченной длины (частный случай деформации), которая представлена на рис. 2.

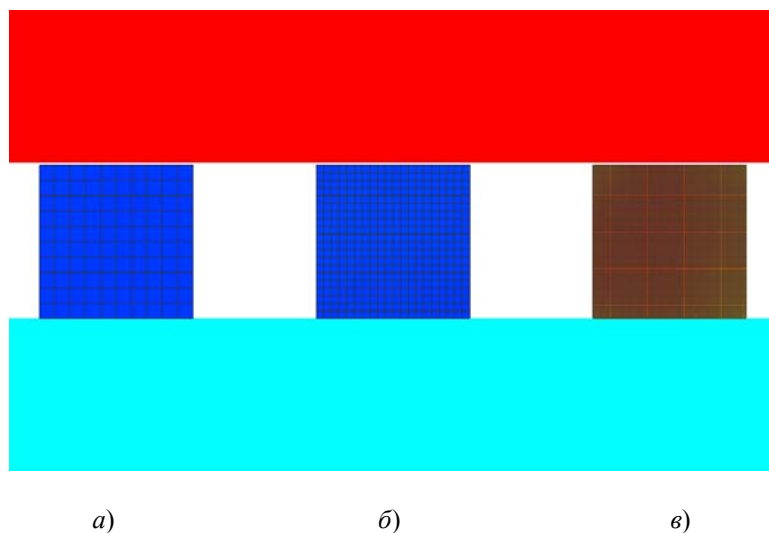


Рис. 2. Двумерная модель осадки полосы ограниченной длины:
а – размер элемента – 1 мм; б – размер элемента – 0,5 мм;
в – размер элемента – 0,1 мм

После деформации были получены результаты, представленные на рис. 3.

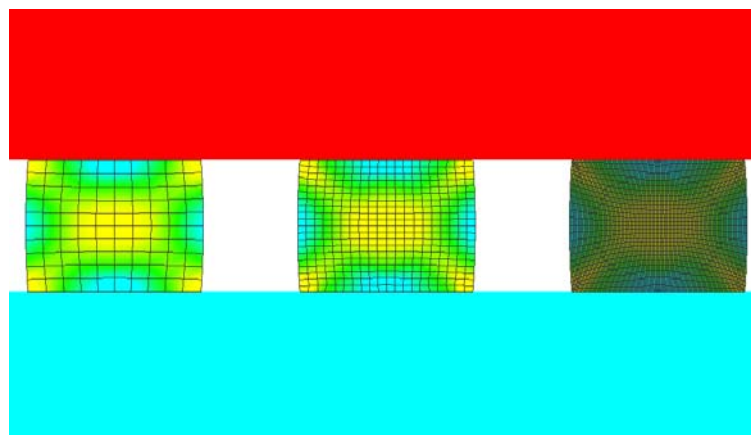


Рис. 3. Результаты численного моделирования

По результатам моделирования видно, что при уменьшении величины сетки конечных элементов наблюдается повышение точности результатов, выражаемое в более четкой картине распределения напряжений при деформации. Так, при величине сетки 1 мм и 0,5 мм не наблюдается локальный минимум напряжений, который расположен в центральной зоне заготовки на границе контакта с инструментом. При более грубой сетке границы зон напряжений размыты и не локализуются.

Таким образом, определено, что при уменьшении величины сетки конечных элементов результаты моделирования напряженного состояния являются более точными, а анализ распределения напряжений – более адекватным. Однако более мелкая сетка приводит к значительному увеличению времени расчетов. Для достижения оптимального режима расчета, когда достоверные результаты могут быть получены с достаточной скоростью, необходимо для каждой модели самостоятельно определять параметры сетки.

Литература

1. Мартянов, Ю. В. Моделирование изгиба металлокорда перед намотом в деформирующих устройствах / Ю. В. Мартянов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики управления : материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2017. – С. 93–96.

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОКОРДА

Д. С. Чубарев

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

Научный руководитель Ю. В. Мартянов

Построены численные модели свивки металлокорда $4 + 3 \times 0,35$ NT и его деформации на ролике. Определены величины, экстремумы остаточных напряжений, формирующихся в процесс деформации проволок свивкой и изгибом. Установлено, что для улучшения технологических свойств металлокорда необходимо обеспечивать равномерность формирования остаточных напряжений.

Ключевые слова: металлокорд, напряжения, моделирование, технологические свойства.

Металлокорд представляет собой витое изделие из проволоки диаметром от 0,1 до 1 мм, которое используется в качестве армирующего элемента автомобильных шин и резиновых полотен. Наиболее распространенный класс прочности металлокорда НТ изготавливается из стали 80. Методы получения высокопрочного металлокорда (волочение проволоки на волочильных станах, свивка металлокорда из проволоки на канатных машинах) не всегда обеспечивают низкий показатель отклонения от прямолинейности металлокорда (менее 80 мм на длине 600 мм). Это влияет на процессы автоматизации производства автомобильных шин, так как автоматические линии производства шин переводятся в ручной режим, что снижает производительность. Основной причиной отклонения от прямолинейности металлокорда являются остаточные напряжения, возникающие в металле в процессе волочения проволоки и свивки металлокорда из проволоки [1].

Для достижения низкого показателя отклонения от прямолинейности металлокорда используются технические и технологические способы, основанные на изгибе и натяжении при волочении проволоки и изгибе металлокорда при свивке. Известные способы не позволяют снизить отклонение от прямолинейности металлокорда до низкого показателя в связи с отсутствием учета неравномерности распределения остаточных напряжений по сечению проволоки и металлокорда, отсутствием учета суммарных напряжений и макроперемещений проволок в конструкции металлокорда.

Производство металлокорда с низким показателем отклонения от прямолинейности является актуальной задачей, так как данное требование компаний-потребителей – важный критерий. При несоответствии металлокорда поставленным требованиям возникают рекламации и возврат металлокорда с последующей его заменой или исправлением, что накладывает дополнительную нагрузку на предприятие-производитель металлокорда.

В процессе свивки металлокорда проволока подвергается крутящим и изгибающим напряжениям. Это в совокупности с напряженно-деформированным состоянием проволоки в процессах волочения и свивки, а также с уровнем внутренних остаточных напряжений, возникающих в проволоке после волочения, делает невозможным прогнозирование изменения свойств проволоки и корда известными расчетными способами. Для корректного расчета свивки металлокорда требуется точный прогноз уровня внутренних остаточных напряжений, возникающих при волочении.

Главным методом исследования величины остаточных напряжений является метод численного моделирования. Использование этого метода, основанного на методе конечных элементов, позволяет получить общую картину напряжений и деформаций проволоки в рихтовальном устройстве с высокой точностью расчетов. Главными требованиями при численном моделировании являются правильное построение модели с точки зрения геометрии, выбор начальных и граничных условий, а также выбор оптимального типа сетки конечных элементов. От выбранного типа конечного элемента, его геометрической формы будет зависеть точность и длительность расчетов, а также адекватность построенной модели.

Численное моделирование в отличие от аналитических способов с достаточной точностью показывает картину напряжений и деформаций не только в упругой, но и в пластической зоне деформации. Это является основным преимуществом перед аналитическими расчетами.

Верификация результатов численного моделирования осуществляется сравнением результатов аналитических вычислений с результатами моделирования.

Построена численная модель свивки и деформации изгибом металлокорда на ролике. Внешний вид модели деформации металлокорда на примере $4 + 3 \times 0,35$ NT представлен на рис. 1.

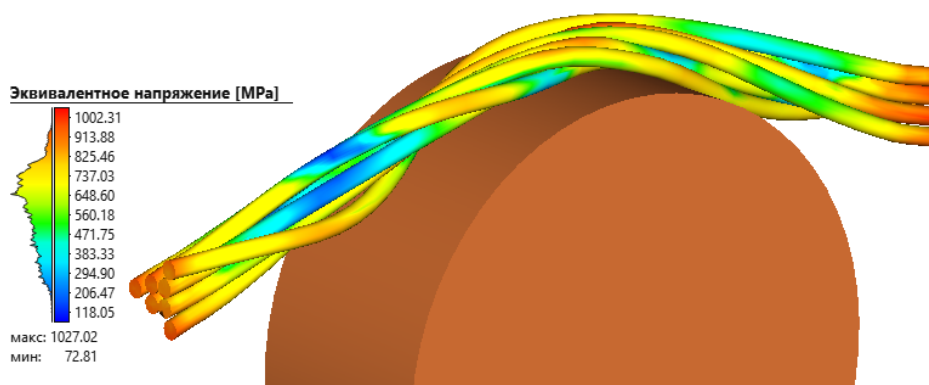


Рис. 1. Внешний вид модели деформации металлокорда $4 + 3 \times 0,35$ NT

После обработки результатов моделирования определяются экстремумы напряжений, распределения напряжений по поперечному сечению. Установлено, что наибольшие напряжения при изгибе металлокорда локализуются в зоне, наиболее

удаленной от центра ролика и от оси свивки металлокорда. Таким образом, в металлокорде преобладают растягивающие объемные напряжения, которые могут быть рассчитаны как геометрическая сумма изгибающих и крутящих напряжений. Это означает, что металлокорда при изгибе находится в сложном напряженном состоянии.

Неравномерное распределение остаточных напряжений в проволоке после волочения, а также высокое значение остаточных напряжений после свивки металлокорда могут увеличить отклонение от прямолинейности металлокорда.

Для уменьшения отклонения от прямолинейности требуется приблизить состояние металлокорда близкое к равновесному состоянию, при котором остаточные напряжения будут равномерно распределены по сечению проволоки. Для этого необходимо достичь условия изгиба металлокорда на деформирующем ролике, при котором смещение точек контакта и изменение эквивалентных напряжений в пределах шага свивки металлокорда минимально.

Л и т е р а т у р а

1. Мартянов, Ю. В. Современные тенденции и перспективы развития производства проволоки и металлокорда для автомобильных шин / Ю. В. Мартянов // I Международный молодежный научно-культурный форум студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых : сб. материалов, Гомель, 5–7 марта 2024 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024. – С. 125. – EDN QJAQIG.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ИЗГИБА МЕТАЛЛОКОРДА НА ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Д. В. Деревянко

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

Научные руководители: Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов

Построены численные модели свивки и изгиба металлокорда. Определено, что количество изгибов металлокорда в роликовой рихтовке влияет на величину эквивалентных напряжений. Установлена зависимость величины эквивалентных напряжений в проволоке металлокорда от количества изгибов металлокорда в рихтовальном устройстве.

Ключевые слова: металлокорд, напряжения, моделирование, технологические свойства.

Цель исследования – изучить влияние способа изгиба металлокорда на его технологические свойства

Металлокорд – стальное витое изделие из проволок, которое используется в качестве армирующего элемента в резинотехнических изделиях.

К технологическим свойствам относятся отклонение от прямолинейности, остаточное кручение и др. Основная причина отклонения технологических свойств от требований – неравномерность остаточных напряжений, их величина и релаксация.

Наиболее современным способом исследования технологических процессов является моделирование с помощью метода конечных элементов. Были построены модель свивки металлокорда, а также модель знакопеременного изгиба металлокорда, которая, в свою очередь, учитывает степень деформации проволок, распределение напряжений и деформаций в проволоках, а также контактное взаимодействие в конструкции металлокорда [1].

Внешний вид численной модели свивки металлокорда представлен на рис. 1.

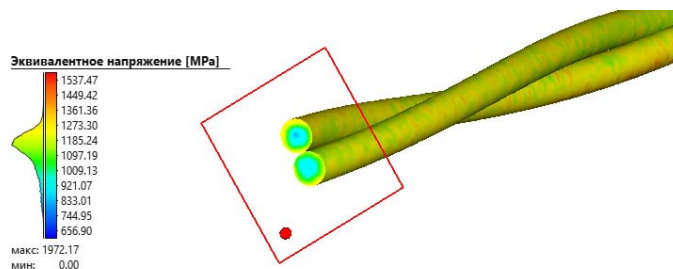


Рис. 1. Внешний вид численной модели свивки

Внешний вид численной модели изгиба металлокорда приведен на рис. 2.

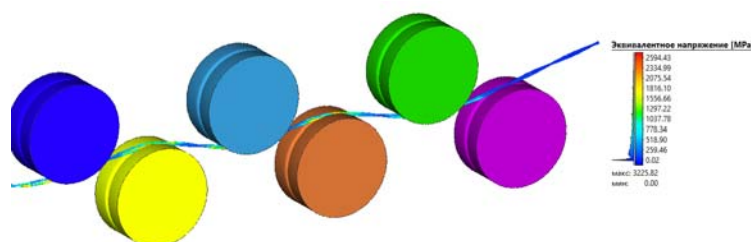


Рис. 2. Внешний вид численной модели изгиба металлокорда

После обработки результатов моделирования определены экстремумы напряжений, распределения напряжений по поперечному сечению. Установлено, что наибольшие напряжения при изгибе проволоки локализуются в зоне, наиболее удаленной от центра ролика. Наибольшие напряжения при изгибе металлокорда локализуются в зоне, наиболее удаленной от центра ролика и от оси свивки металлокорда. Таким образом, в проволоке преобладают растягивающие линейные напряжения, а в металлокорде – растягивающие объемные напряжения, которые могут быть рассчитаны как геометрическая сумма изгибающих и крутящих напряжений.

Зависимость величины эквивалентных напряжений в проволоке металлокорда от количества изгибов металлокорда в рихтовальном устройстве имеет вид:

$$\sigma = 92,634x^2 - 479,01x + 20260, \quad (1)$$

где σ – эквивалентные напряжения в проволоке металлокорда, МПа; x – количество изгибов в рихтовальном устройстве.

Эквивалентные напряжения при изгибе имеют величину, соответствующую 65–70 % от предела прочности проволоки металлокорда, что является рекомендуемой величиной эквивалентных напряжений для уменьшения эффекта релаксации проволоки и для уменьшения отклонения от прямолинейности металлокорда [2].

Определено, что количество изгибов металлокорда в роликовом рихтовальном устройстве влияет на величину эквивалентных напряжений в металлокорде и, следовательно, на прямолинейность металлокорда, что является основным технологическим свойством металлокорда.

Литература

- 1 Мартянов, Ю. В. Современные тенденции и перспективы развития производства проволоки и металлокорда для автомобильных шин / Ю. В. Мартянов // I Международный молодежный научно-культурный форум студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых : сб. материалов, Гомель, 5–7 марта 2024 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024. – С. 125. – EDN QJAQIG.
2. Бобарикин, Ю. Л. Исследование процесса рихтовки тонкой высокоуглеродистой стальной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов, О. Ю. Ходосовская // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. / Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред) [и др.]. – Минск, 2024. – С. 288–293.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО НАНЕСЕНИЯ ПОРОШКОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

А. Д. Тамков

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

Научный руководитель А. Н. Швецов

Экспериментально определено электросопротивление антифрикционного композиционного материала для расчета температуры в зоне контакта при электроимпульсном нанесении антифрикционных металлофторопластовых порошковых покрытий.

Ключевые слова: электроимпульсное спекание, пресс-форма, электросопротивление композиционного материала.

Одним из перспективных методов нанесения износостойких самосмазывающихся порошковых покрытий является метод электроимпульсного спекания [1]. Данный способ позволяет получать покрытия из антифрикционного металлофторопластового порошкового материала, имеющего расширенный диапазон эксплуатационных свойств за счет возможности совместного использования фторопластового и металлических компонентов.

На основании известных физических величин температура в зоне деформации при пропускании через нее электрического тока определяется по зависимости [2]:

$$T_{\kappa} = \frac{I^2 \cdot t_c [4\rho \cdot h / d_t^2 + R_m]}{4m\sqrt{\lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot v \cdot \delta \cdot \sqrt{t_c}}} + \frac{P_d \cdot h_n}{4m\sqrt{\lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot S \cdot \sqrt{t_c}}}, \quad (1)$$

где I – сила тока, А; $m = 1/2$ – коэффициент, учитывающий неравномерность падения температуры; t_c – время сварки, с; R_m – электросопротивление материала, Ом; ρ – удельное электросопротивление, Ом · м; h_n – толщина проплавления, м; d_t – диаметр точки проплавления, м; λ – плотность материала, кг/м³; γ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м · К); c – удельная теплоемкость материала, Дж/К · кг; v – скорость движения роликов, м/с; h – начальная высота полосы до прокатки, м; P_d – контактное давление, Па; S – площадь контакта прокатываемого материала с вальками-электродами, м².

При расчете температуры в зоне контакта по данной зависимости наибольшую трудность составляет определение электросопротивления композиционной составляющей.

Целью данной работы являлось экспериментальное определение электросопротивления при нагреве антифрикционных композиционных материалов.

В качестве исследуемой композиции была выбрана следующая антифрикционная металлофторопластовая порошковая смесь при следующем соотношении компонентов, мас. %: Fe – 62,5–77,0, ПТФЭ-4 – 5–10, Cu – 5–10, Ni – 5–10, Sn – 1–2,5, омедненного графита – 4–5.

Для экспериментального определения электросопротивления была создана и использована опытная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1. В соответствии с ней источник питания и измерительный мост подсоединен к пресс-форме, на которую воздействует исполнительная машина. Показания электросопротивления композиционного материала определялись с помощью гальванометра.

Также разработана и изготовлена пресс-форма, конструкция которой приведена на рис. 2.



Рис. 1. Структурная схема опытной установки

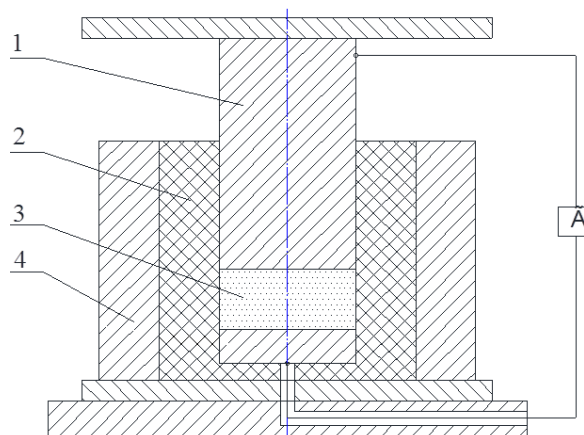


Рис. 2. Конструкция пресс-формы:
1 – пуансон; 2 – электроизоляционный материал;
3 – композиционный материал; 4 – матрица

Для определения электросопротивления композиционного материала использовался статистический метод планирования многофакторного эксперимента. В качестве варьируемых факторов были выбраны температура и давление, воздействующие на композиционный материал.

Предварительно методом «крутого восхождения» с учетом технических характеристик экспериментальной установки была экспериментально определена область изменения интервалов варьирования. Дальнейшее исследование совместного влияния варьируемых факторов проводилось с помощью метода рототабельного планирования.

Для проверки однородности дисперсий параллельных опытов использовался критерий Кохрена. Гипотеза об однородности дисперсий была подтверждена при уровне значимости $\alpha = 0,5$, что позволяет использовать регрессионный анализ и провести статистическую обработку полученных результатов эксперимента. Коэффициенты регрессии рассчитывались на ЭВМ.

После обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, отражающее влияние факторов на исследуемую функцию. Проверка адекватности математической модели проводилась с помощью F -критерия Фишера для уровня значимости $\alpha = 0,05$.

Уравнение регрессии для определения электросопротивления:

$$R = 1,56931 - 0,0246 \cdot T_k + 0,00009 \cdot T_k^2 - 1,35585 \cdot P + 0,3031 \cdot P^2 + 0,0107 \cdot T_k \cdot P. \quad (2)$$

После подстановки значений в уравнение (1), которое решалось с помощью ЭВМ, рассчитанные значения температура в зоне контакта проверялись экспериментально с помощью скользящей термопары.

На основе экспериментальных и расчетных данных была построена зависимость температуры в контакте от импульсного электротока (рис. 3).

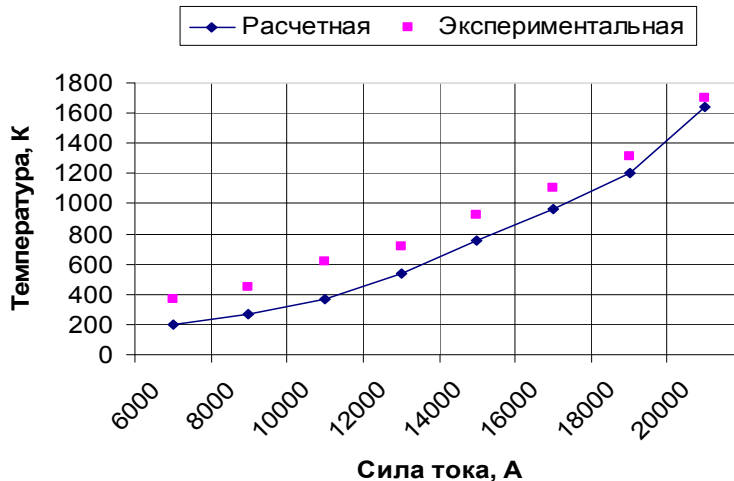


Рис. 3. Зависимость температуры от величины электроимпульсного тока:
1 — экспериментальная температура; 2 — расчетная температура

Как видно из графика рис. 3, характер изменения экспериментальной и теоретической температуры в контакте от давления одинаков. Это позволяет сделать заключение, что полученное уравнение регрессии для определения электросопротивления верно описывает данный процесс. Несколько завышенные значения экспериментальной температуры по сравнению с расчетной связаны с тем, что при расчете сопротивления деформации для определения давления при горячей прокатке термомеханические коэффициенты принимались как для компактного железного материала без посторонних включений.

Литература

1. Патент РБ № 18498. Способ получения покрытия из антифрикционного металлофторопластового порошкового материала / Бобарикин Ю. Л., Швецов А. Н., Шишков С. В. – 2010.
2. Кочергин, К. А. Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 240 с.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ФРЕЗЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СОТС**

Э. Р. Ваниев, Э. Ш. Джемилов, Э. Л. Бекиров, А. В. Крыжановский

*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
г. Симферополь, Республика Крым*

Приведены результаты моделирование стойкости инструмента от режимных параметров приработки, а также режимов резания приработанного инструмента и исследование их влияния на стойкость зубьев фрез отдельно для каждой из используемых технологических сред.

Ключевые слова: СОТС, фрезерование, режимы резания, стойкость, приработка, моделирование.

Постановка задачи и цель исследований. Фрезерование представляет собой разновидность механической обработки, функционирование которой как системы зависит от множества факторов (переменных), обуславливающих как протекание процесса резания в виде физико-химических явлений его сопровождающих, так и его выходные характеристики – производительность и себестоимость обработки, стойкость инструмента, показатели качества поверхности и др. [1–3].

Рассмотрение системы механической обработки и особенностей процесса резания как совокупности взаимосвязанных явлений, возникающих при образовании структуры, позволяет утверждать, что использование смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) оказывает существенное влияние на их интенсивность и тем самым влияет на стойкость инструмента.

В современной теории резания процесс стружкообразования рассматривается как термомеханический процесс [2, 3], определяемый множеством взаимосвязанных первичных параметров механической обработки. Учитывая это, влияние СОТС на механизм процесса резания без взаимосвязи с другими факторами не может быть установлено в такой мере. Однако влияние СОТС на параметры процесса резания во взаимосвязи с другими факторами, определяющими систему механической обработки, практически не исследовано.

Исходя из термомеханического подхода в теории резания контактные нагрузки, действующие на инструмент, и температура резания для пары «обрабатываемый материал–инструмент», прежде всего, определяются режимами резания и СОТС, в присутствии которой происходит обработка. Поэтому исследование влияние режимов резания в некотором диапазоне их изменения и различных СОТС на стойкость инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т является актуальной задачей и имеет большое практическое значение при разработке рекомендаций по использованию СОТС в различных условиях эксплуатации.

Цель исследования – установление влияние режимов резания на стойкость быстрорежущих фрез при использовании различных СОТС с использованием технологии минимальной смазки (ТМС) для разработки рекомендаций по рациональному использованию технологических сред при обработке стали 12Х18Н10Т.

Анализ последних исследований и публикаций. Известно, что в процессе резания наблюдается три вида износа: приработочный, нормальный и катастрофический. Исследованиями [5] установлено, что приработка инструмента на более низких режимах резания приводит к значительному повышению стойкости инструмента в сравнении с дальнейшей его эксплуатации на более высоких режимах резания. Это объясняется тем, что в процессе приработки на контактных поверхностях инструмента наблюдается пластическая деформация контактных (локальных) микрообъемов, вследствие которой происходит их упрочнение (включая образование химических соединений).

Упрочнение инструмента резанием зависит от среды, в которой осуществляется приработка. По результатам, приведенным в этой работе, можно предположить, что при обработке сталей аустенитного класса, к которым относится и сталь 12X18H10T, одним из перспективных направлений повышения работоспособности инструмента является применение СОТС на основе растительных масел с использованием ТМС. Однако приведенные исследования проводились только при точении. Поэтому они в полной мере не могут быть отнесены к фрезерованию. Кроме того, вопрос эффективного использования различных СОТС во взаимосвязи с другими факторами, определяющими процесс резания, в этих исследованиях не рассматривался.

Впервые на основе математического моделирования с использованием одного из методов самоорганизации – группового учета аргументов в результате обработки экспериментальных данных была получена модель в виде зависимости стойкости фрезы от режимов резания и обобщенной характеристики той или иной СОТС. В качестве обобщенной характеристики СОТС была выбрана адгезионная составляющая (μ_a) коэффициента трения пары 12X18H10T – P6M5.

Предполагалось получить модель в виде функции $T = f(V_{\text{пр}}, S_z, V_c, t, \mu_a)$, где скорость приработки изменялась в диапазоне $V_{\text{пр}} = (12,2\text{--}27,9)$ м/мин, а скорость фрезерования после приработки при постановке экспериментов изменялась в диапазоне $V_c = (27,4\text{--}49,6)$ м/мин.

Значения остальных переменных в каждом эксперименте были одинаковыми как на стадии приработки, так и при работе инструмента после приработки и изменялись в пределах $S_z = (0,1\text{--}0,3)$ мм/зуб; $t = (0,4\text{--}2)$ мм и $\mu_a = (0,13\text{--}0,31)$, соответственно для смазки МР-99 – $\mu_a = 0,13$, для рапсового масла – $\mu_a = 0,2$; для касторового масла – $\mu_a = 0,26$ и для И-20А – $\mu_a = 0,31$.

Таким образом, по аналогии согласно работе [5] отличие режима приработки инструмента от режима его работы после приработки определялось только скоростью приработки. Влияние исследуемых переменных на стойкость осуществляется в тесной взаимосвязи друг с другом. В данных моделях влияние скорости приработки на стойкость исследуемого инструмента не выявлено.

Это может быть объяснено тем, что коэффициент адгезионной составляющей μ_a коэффициента трения не может служить характеристикой СОТС, несущей информацию об эффектах каждой из них, как это было предложено в работе [6]. Поэтому не представляется возможным синтезировать одну модель, по которой можно было определять стойкость фрез в зависимости от вида различных СОТС.

Следовательно, возникает задача построения моделей в виде зависимостей $T = f(V_{\text{пр}}, S_z, V_c, t)$ при использовании отдельно каждой из СОТС.

Рассмотрим моделирование стойкости инструмента с использованием различных сред. Синтез зависимостей $T = f(V_{\text{пр}}, S_z, V_c, t)$ осуществлялся по предложенной методике, и в тех же пределах исследуемых переменных ($V_{\text{пр}}, S_z, V_c$, и t). В результате обработки экспериментальных данных получены модели.

Анализ структур полученных моделей показывает, что режимные параметры оказывают влияние на стойкость во взаимосвязи друг с другом. Следует отметить, что в присутствии индустриального масла И-20А в выбранных пределах изменения глубина резания на стойкость инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т не оказывает влияния.

Количественную оценку каждого из факторов для каждой из исследуемых СОТС можно определить при исследовании зависимостей: $T = f(S_z)$, $T = f(V_{пр})$, $T = f(V_c)$ и $T = f(t)$.

Влияние исследуемых переменных на стойкость инструмента. Исследование каждой из рассматриваемых переменных проводилось по графическим зависимостям стойкости от каждой из переменных, полученных соответственно по моделям. Выбор значений режимных параметров для построения стойкостных зависимостей от них продиктованы рекомендациями приработки при точении стали 12Х18Н10Т [5].

Анализ этих зависимостей показывает, что наибольшее влияние на стойкость оказывает подача на зуб (S_z) в присутствии касторового масла. При этом интенсивность ее влияния на стойкость в большей степени проявляется при скорости приработки $V_{пр} = 28$ м/мин. При приработке со скоростью $V_{пр} = 28$ м/мин, подачей $S_z = 0,1$ мм/зуб стойкость фрезы достигает 347 мин, т. е. более чем в 2,4 раза выше стойкости фрезы при сухой обработке на тех же режимах.

С увеличением S_z эффективность использования касторового и рапсового масел в сравнении с сухой обработкой повышается. Так, в присутствии касторового масла при скоростях приработки $V_{пр} = 15,5$ м/мин и $V_{пр} = 28$ м/мин стойкость инструмента соответственно в 4,1 и 2,5 раза выше стойкости при сухой обработке. При использовании рапсового масла при тех же значениях подачи на зуб и скоростей приработки стойкость соответственно выше по сравнению с сухой обработкой в 4 и 6 раз.

Проведенный анализ и анализ графических зависимостей показывают, что при $V_{пр} = 15,5$ м/мин в диапазоне S_z от 0,1 мм/зуб до 0,2 мм/зуб лучшие результаты по стойкости инструмента наблюдается при использовании касторового масла. При приработке зубьев фрез в $V_{пр} = 28$ м/мин наблюдается повышение их стойкости при использовании касторового масла до $S_z = 0,15$ мм/зуб.

Сопоставляя результаты исследований влияния режимных параметров приработки и дальнейшей эксплуатации фрез после приработки на стойкость инструмента в присутствии касторового масла, установлено, что с уменьшением подачи S_z , глубины резания стойкость инструмента резко увеличивается, и это позволяет рекомендовать наиболее эффективное использование касторового масла при фрезеровании, стали 12Х18Н10Т в условиях чистой обработки.

Влияние глубины резания на стойкость инструмента в присутствии рапсового масла значительно меньше, чем при использовании касторового масла. При $V_{пр} = 15,5$ м/мин некоторое снижение наблюдается при увеличении глубины резания до $t = 0,8$ мм. При $V_{пр} = 28$ м/мин уменьшение стойкости инструмента происходит при увеличении глубины до $t = 1,2$ мм в 1,4 раза. Дальнейшее повышение глубины резания не влияет на изменение стойкости.

Таким образом, анализируя результаты зависимостей стойкости от режимных параметров процесса приработки инструмента и его работы после приработки фрезерование при использовании рапсового масла более эффективно применять в условиях получистового резания.

Изменение глубины резания от 0,4 мм до 2,0 мм при сухом резании независимо от значений скорости приработки, уменьшает стойкость зубьев фрез в 2,7 раза.

Проведенный анализ влияния на стойкость инструмента режимов приработки и режимов фрезерования приработанным инструментом в присутствии различных технологических сред показал, что использование растительных масел (касторового и рапсового) значительно повышает стойкость зубьев фрез в сравнении с сухой обработки и с использованием таких СОТС, как МР-99 и И-20А.

Показано, что для чистовой обработки наиболее эффективно применить в качестве СОТС с использованием технологии минимальной смазки касторовое масло. При фрезеровании с глубинами резания более 0,5–0,8 мм целесообразно применять рапсовое масло.

Установлено, что наибольшее влияние на стойкость инструмента в принятом диапазоне изменения режимов резания оказывают подача на зуб и глубина резания для растительных масел, используемых в качестве СОТС, а при сухой обработке и при использовании СОТС МР-99 и И-20А – подача на зуб.

Литература

1. Ящерицын, П. И. Теория резания : учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.
2. Васин, С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
3. Розенберг, Ю. А. Резание материалов : учеб. для техн. вузов / Ю. А. Розенберг. – Курган : ОАО «Полиграфический комбинат», 2007. – 294 с.
4. Якубов, Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким. – Симферополь, 2005. – 300 с.
5. Якубов, Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь : ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.
6. Бесарабев, Ю. И. О возможности использования в качестве оценки трибологических свойств СОТС коэффициента трения пары инструментальный-обрабатываемый материалы / Ю. И. Бесарабев, Э. Р. Ваниев, П. В. Скринник // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». – Харьков, 2012. – Вып. 82. – С. 10–17.

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОСОВОГО АНТИФРИКЦИОННОГО МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

А. Д. Тамков

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

Научный руководитель А. Н. Швецов

Разработан способ нанесения металлофторопластовых антифрикционных покрытий на стальную полосу-подложку способом электроимпульсного припекания.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, предварительное формование, электроимпульсное спекание, подшипники скольжения.

В мировой практике создания антифрикционных материалов для самосмазывающихся подшипников скольжения в условиях эксплуатации до 300 °С в различных средах наиболее эффективными являются композиционные материалы, имеющие в качестве основного смазывающего наполнителя политетрафторэтилен (ПТФЭ) с техническим названием в СНГ – фторопласт (в США – тефлон, в Англии – флуон, во Франции – гафлон, в Японии – полифлон, в Италии – агофлон, в ФРГ – гостафлон).

Из этих материалов изготавливаются подшипники скольжения различных конструкций. Областью применения таких подшипников является их использование в самых различных узлах трения, где невозможна подача смазывающих веществ.

Среди способов получения подобных материалов наиболее перспективный метод – введение порошкового наполнителя на основе ПТФЭ непосредственно в порошковую шихту металлического материала матрицы определенного состава и обработка всей шихты в температурно-деформационных режимах, не приводящих к разложению ПТФЭ и обеспечивающих создание достаточно прочной металлической матрицы, надежно удерживающей наполнитель с ПТФЭ, равномерно распределенный по всему объему материала. Такой композиционный порошковый материал может наноситься на металлическую несущую основу.

Температура разложения ПТФЭ составляет 973 К при 196 МПа и возрастает до 1027 К при 294 МПа [1].

Используя явление повышения температуры разложения ПТФЭ с ростом давления, разработан способ получения металлофторопластовых антифрикционных покрытий.

Данный способ проводится в два этапа: 1) предварительное формование; 2) электроимпульсное припекание.

На рис. 1 представлена схема предварительного формования. Процесс производится при давлении 400–500 МПа.

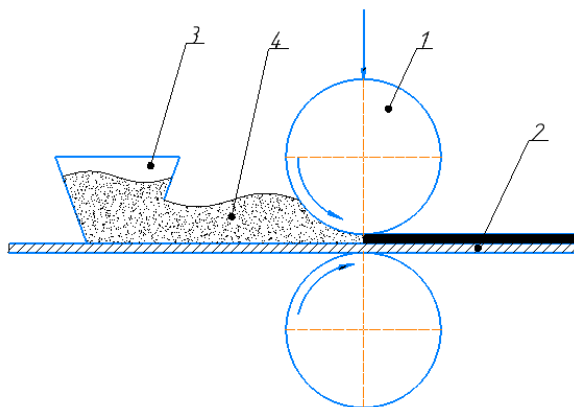


Рис. 1. Схема установки для предварительного формования:
1 – валки; 2 – полоса-подложка; 3 – дозирующее устройство;
4 – порошковый композиционный материал

На стальную полосу-подложку насыпают слой порошковой шихты и прокатывают между двумя прокатными валками на прокатном стане. Для обеспечения точной дозировки порошкового материала используется дозирующее устройство.

После формования полоса прокатывается между двумя прокатными валками-электродами, подключенными к сварочному трансформатору. На рис. 2 представлена схема электроимпульсного спекания. Электрический ток подается кратковременными импульсами малого напряжения 4–10 В и большой силы 5–14 кА.

В результате этого метода металлический порошок формируется в сплошной композиционный слой, соединенный с подложкой.

Данным методом можно обрабатывать металлические смеси порошков на основе меди, олова, свинца и железа, без ущерба свойствам фторопластового наполнителя.

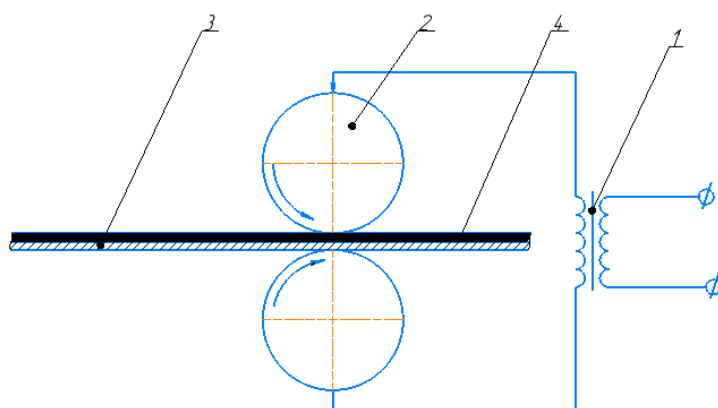


Рис. 2. Схема установки для электроимпульсного спекания:
1 – трансформатор; 2 – валики-электроды; 3 – полоса-подложка,
4 – спеченный композиционный материал

Разработанный метод применяется главным образом для изготовления материала, используемого для штамповки подшипников скольжения. Благодаря сочетанию металлических порошков и ПТФЭ нормальные и тангенциальные нагрузки в поверхностном слое трения воспринимаются не фторопластом, а металлическим пористым каркасом. В то же время, обладая более высоким коэффициентом термического расширения, ПТФЭ выделяется из пор, обеспечивая смазку при трении с коэффициентом сухого трения 0,13. Характер линейного износа материала приведен на рис. 3.

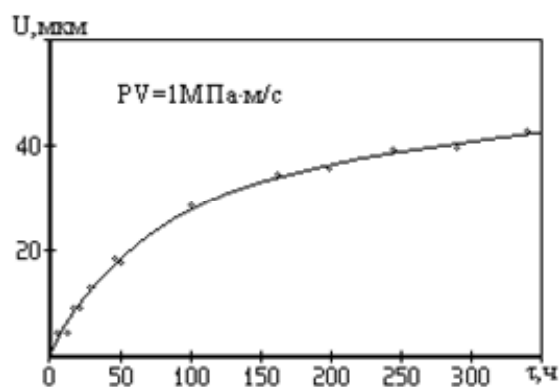


Рис. 3. Характер износа композиционного покрытия

Проведенные структурные и эксплуатационные исследования материала позволяют сделать заключение, что данный способ дает возможность создать с помощью термомеханического воздействия композиционную структуру с компонентами, имеющими большую разницу температур плавления. При этом избыточное механическое воздействие компенсирует недостаток термического воздействия, ограничивает объемный разогрев композита и сохраняет легкоплавкие компоненты.

Литература

1. Фторполимеры. – М. : Мир, 1975. – 445 с.

МИКРОПАСТИК: ЧТО ЭТО ТАКОЕ И КАК С НИМ БОРОТЬСЯ?**И. В. Селюков***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Рассмотрена проблема угрозы микропластика. Обсуждены его источники, а также влияние на здоровье человека и экосистемы. Микропластик может вызывать воспалительные процессы, токсические эффекты и негативно сказываться на микробиоме. Предложены методы борьбы с микропластиком, такие, как переход на многоразовые альтернативы, инвестиции в переработку, установка фильтров на очистных сооружениях. Подчеркнута необходимость комплексного подхода и активных действий для защиты здоровья человека и окружающей среды.

Ключевые слова: микропластик, здоровье человека, экосистемы, загрязнение, переработка.

Микропластик – это частицы различных пластиков, размер которых менее 5 мм. Они делятся на два основных типа: первичный и вторичный. Первичный микропластик включает в себя частицы, которые производятся в таком виде, как, например, в некоторых косметических средствах (скрабы, гели для душа) или в качестве гранул для дальнейшего производства пластиковых изделий. А вторичный микропластик образуется в результате разложения более крупных пластиковых объектов, таких как бутылки, пакеты и упаковка под воздействием солнечного света, воды и других факторов окружающей среды и техногенных воздействий. Источники микропластика разнообразны и состоят из материала соответствующего полимера.

Наиболее распространенный материал для производства бутылок для напитков – полиэтилентерефталат (ПЭТ). При многократном использовании таких бутылок образуются микрочастицы пластика. Многоразовые пищевые контейнеры, пластиковые разделочные доски и пакетики для чая также являются источниками микропластика. Пакеты из целлюлозы менее опасны, в то время как капроновые «пирамидки» могут выделять больше микрочастиц. Микропластиковая пыль может попадать и в мед, когда пчелы принимают ее за пыльцу. В сахаре источником микропластика может быть пыль, образующаяся на производстве, а в соли он появляется в процессе выпаривания больших объемов морской воды. Каменная соль содержит значительно меньше микропластика.

Микропластик образуется в процессе износа автомобильных шин. При движении автомобиля шины подвергаются трению о дорогу, что приводит к их износу и выделению мелких пластиковых частиц. Эти микрочастицы затем попадают в окружающую среду через дождь, ветер или непосредственно с дорожной поверхности. Исследования показывают, что износ шин является значительным источником микропластика, который загрязняет почву и водоемы, оказывая негативное влияние на экосистемы [1].

Микропластик представляет угрозу для здоровья человека. Он попадает в организм через пищу и воду. Например, морепродукты, которые были загрязнены микропластиком, могут стать источником этих частиц для человека. Исследования показывают, что микропластик вызывает воспалительные процессы. Микрочастицы проникают в клетки и ткани, вызывая повреждения и воспаление. Это приводит к различным хроническим заболеваниям, таким как воспалительные заболевания кишечника и сердечно-сосудистые болезни. Некоторые химические вещества, связанные с пластиком, могут

быть токсичными и вызывать серьезные заболевания. Микропластик способен содержать и переносить различные опасные химические вещества, такие, как бисфенол А, фталаты и полихлорированные бифенилы [5]. Эти вещества вызывают эндокринные расстройства, влияя на гормональную систему, и могут способствовать развитию различных заболеваний, включая рак. Химические добавки, используемые при производстве пластика, также могут выделяться и накапливаться в организме, увеличивая токсическую нагрузку. Микропластик негативно влияет на микробиом кишечника, который играет важную роль в поддержании иммунной системы и общего здоровья. Нарушения в микробиоме приводят к снижению иммунитета, повышенному риску инфекций и развитию аутоиммунных заболеваний. Это также сказывается на процессе переваривания пищи и усвоении питательных веществ.

Микропластик имеет свойство накапливаться в организмах через биомагнификацию, что означает, что его концентрация увеличивается по мере продвижения по пищевой цепочке – от планктона к рыбе, а затем к человеку. Высокие уровни накопления микропластика приводят к серьезным проблемам со здоровьем, включая повреждение органов и тканей. Недавние исследования выявили еще одну угрозу, связанную с микропластиком: он может повышать риск инсульта. Микропластик способен проникать в кровоток, вызывать воспалительные процессы в сосудах и увеличивать вероятность образования тромбов. Это приводит к нарушениям кровообращения и инсульту [3].

Микропластик оказывает значительное влияние на экосистему, затрагивая как водные, так и наземные экосистемы. Вот несколько ключевых аспектов этого воздействия. Микропластик проникает в океаны, реки и озера, где становится частью водной экосистемы. Он может образовывать большие скопления, такие, как «мусорные острова» в океанах, что негативно сказывается на морской флоре и фауне. Микропластиковые частицы поглощают токсичные химические вещества из окружающей воды, что усугубляет проблему [2]. Поглощение микропластика водными организмами представляет собой экологическую проблему, поскольку мелкие пластиковые частицы, образующиеся в результате разложения крупных пластиковых изделий, попадают в водоемы через сточные воды и дождевые стоки. Многие морские и пресноводные организмы случайно поглощают микропластик вместе с пищей, что вызывает механические повреждения, нарушения пищеварения и токсическое воздействие. Микропластик накапливается в организмах и передается по пищевой цепи, увеличивая его концентрацию у хищников, что нарушает пищевые цепи и снижает биоразнообразие [4].

Снижение качества почвы из-за микропластика представляет собой экологическую проблему, затрагивающую сельское хозяйство и экосистемы. Микропластик попадает в почву через сельскохозяйственные практики, сточные воды и разложение пластиковых изделий, изменяя физические свойства почвы, такие как структура и дренаж, что ухудшает удержание влаги. Он также негативно влияет на микробиом, снижая разнообразие микроорганизмов и способствуя росту патогенных бактерий, что затрудняет усвоение питательных веществ растениями и может приводить к их токсичности. В результате снижается урожайность, увеличиваются затраты на удобрения и средства защиты. Это создает экономические проблемы и угрожает качеству продуктов питания и здоровью экосистем в долгосрочной перспективе. Это требует активного внимания и действий для защиты окружающей среды долгосрочных и краткосрочных, многоразовых и одноразовых, таких как [1]:

– замена одноразовых пластиковых изделий многоразовыми, такими как стеклянные бутылки, металлические контейнеры, тканевые сумки и многоразовые трубочки. Это значительно снижает количество производимого пластика;

– инвестиции в переработку, а именно – в разработку и внедрение новых технологий для переработки пластика, включая механическую и химическую переработку, что позволит перерабатывать больше видов пластика;

– установка фильтров на очистных сооружениях, которые могут задерживать микропластик и другие загрязнители перед сбросом сточных вод в водоемы;

– запрет на определенные виды пластика: введение законов, ограничивающих или запрещающих использование одноразового пластика, например, пластиковых пакетов и соломинок;

– организация акций по очистке: проведение волонтерских акций по очистке пляжей, рек и озер, что не только помогает убрать микропластик, но и повышает экологическую культуру общества;

– использование технологий для сбора: разработка и внедрение технологий, таких как специальные устройства для сбора микропластика из воды (например, «Ocean Cleanup»), которые могут эффективно удалять загрязнения из океанов и рек.

Уже сейчас в своей повседневной жизни мы можем предпринять простые шаги для защиты от микропластика, например, избегать повторного использования деформированных бутылок и утилизировать их в специальные контейнеры для раздельного сбора отходов; выбирать посуду из безопасных материалов, таких, как керамика, дерево, металл или стекло; при использовании пластиковых контейнеров следует внимательно следить за их состоянием и заменять поврежденные изделия.

Вкладом авторов статьи в решение данной проблемы является разработка метода очистки от микропластика, который заключается в применении для очистки воды мембран с градиентом пористости. Градиент пористости создается путем использования диспергированного и рассеянного материала с дальнейшим спеканием фракций. Необходимая пористость обеспечивается путем расчетов и подбором фракций. В результате образуется фильтр с градиентной пористостью, где размер пор постепенно уменьшается. Такие фильтры устойчивы к засорению, так как процесс происходит по всему объему в отличие от фильтров с однородной пористостью. Для реализации идеи авторам предстоит работа по оптимизации состава материала, расчету параметров структуры градиентного материала и отработке режимов получения таких фильтров.

Таким образом, проблема микропластика представляет собой серьезный вызов, с которым сталкивается наше общество и экосистемы планеты. Однако, несмотря на масштабность проблемы, мы обладаем инструментами и знаниями, необходимыми для ее решения. Главное – их активно использовать.

Литература

1. Ухарцева, И. Ю. Проблемы утилизации бытовых полимерных отходов: технология и экология / И. Ю. Ухарцева, С. Н. Бобрышева, И. В. Селюков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 28–42.
2. Селюков, И. В. Экологические проблемы утилизации бытовых полимеров / И. В. Селюков, И. Ю. Ухарцева // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – С. 91–94.
3. Федоров, А. В. Микропластик в пищевых цепях: влияние на здоровье человека / А. В. Федоров // Экология и здоровье. – 2021. – № 2 (3). – С. 22–28.
4. Баймуканов, М. Т. Казахстан о пластиковом загрязнении и потенциальном его воздействии на биоразнообразие каспийского моря / М. Т. Баймуканов, Ж. М. Баймуканова // Новости науки Казахстана. – 2021. – № 2 (149). – С. 1–5.

5. Негативное влияние микропластика: системы-мишени организма человека / П. А. Ермачкова, А. Н. Кравченко, О. А. Залата, С. Э. Шибанов // Мотивационные аспекты физической активности : материалы V Всерос. междисциплинар. конф., Великий Новгород, 26 февр. 2021 г. / Новгор. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого ; редкол.: Р. Я. Власенко (отв. ред.) [и др.]. – Великий Новгород, 2021. – С. 23–28.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ УГЛЕВОЛОКНА

К. Ю. Савицкий

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

Научные руководители: П. Н. Гракович, С. Н. Целуева

На примере программного продукта, написанного на языке программирования Python, выполняющего по цифровым фотоснимкам группировку измельченных углеродных волокон по длине для последующего изучения влияния времени измельчения на фракционный состав и длину углеродных волокон различного типа, показана эффективность использования систем автоматизации в лабораторном анализе.

Ключевые слова: углеродное волокно, композиционный материал, длина углеродного волокна, измельчение, структурирование экспериментальных данных, язык программирования Python.

Углеродное волокно (УВ) – искусственный материал, получаемый термической обработкой исходных химических или природных волокон (прекурсоров) и характеризующийся высоким содержанием (до 99,9 % по массе) углерода. Они представляют собой тонкие нити диаметром от 3 до 15 мкм, образованные преимущественно атомами углерода, которые объединены в микроскопические кристаллы, выровненные параллельно друг другу. Упорядочивание кристаллов придает волокну большую прочность на растяжение [1]. Характеризуются УВ высокой прочностью, низким удельным весом, низким коэффициентом температурного расширения и химической инертностью, что определяет столь широкое их применение в различных сферах деятельности. ОАО «СветлогорскХимволокно» является крупным производителем углеродных волокнистых материалов и композитов на их основе [2–4]. Выпускаемые в Светлогорске УВ широко используются в измельченном состоянии в антифрикционных композиционных материалах семейства «Флувис», разработанных в ИММС НАН Беларуси. Одним из важнейших показателей является качество измельчения УВ, выражающееся функцией распределения волокон по длинам.

Объекты исследования в данной работе – углеродные волокна на основе гидратцеллюлозы производства ОАО «СветлогорскХимволокно».

Цель работы – разработка на языке Python программы, выполняющей группировку измельченных УВ по длине, и применение ее для последующего изучения влияния времени измельчения на фракционный состав и длину УВ различного типа.

Методика и порядок подготовки образцов для получения цифровых фотоснимков:

1. Выбор партии волокна.
2. Отбор необходимого количества волокна из партии.
3. Подготовка взвеси измельченных УВ в жидкости, например, в этиловом спирте.

4. Нанесение взвеси на предметное стекло. Часть взвеси наносится на предметное стекло, на котором находится в течение ~2 ч. За это время происходит полное испарение спирта.

5. Визуальная проверка стекла на наличие волокон.

6. Микроскопический анализ и получение цифровых фотоснимков. Для анализа применялся электронный цифровой микроскоп компании Carl Zeiss Jena, который позволяет выполнять цифровые фотоснимки. Пример фотоснимка представлен на рис. 1.

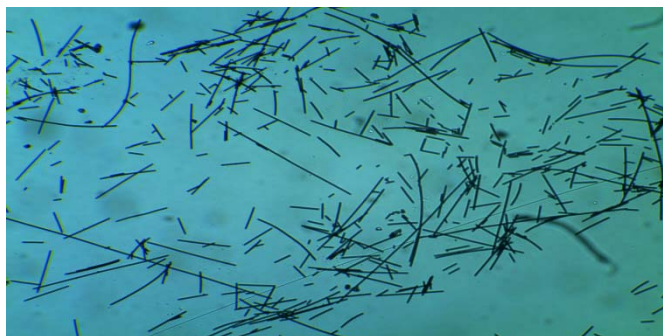


Рис. 1. Фото углеродных волокон под микроскопом

Полученные цифровые фотоснимки обрабатывались разработанной в ходе выполнения работы программой для анализа волокон по таким параметрам, как длина и площадь. Результаты анализа программа сохраняет в виде таблицы в табличном процессоре Excel, что удобно для последующего изучения влияния времени измельчения на фракционный состав и длину с целью оптимизации технологических параметров измельчения УВ, необходимых для получения композиционных материалов.

Алгоритм работы программы. Для повышения точности анализа необходимо отредактировать изображения, полученные на цифровых фотоснимках. Для этого программа содержит функционал изменения яркости и контрастности изображения.

В алгоритме распознавания волокон программы можно выделить несколько шагов:

1. Подготовка изображения, изменение его яркости и контрастности, чтобы функция threshold (позволяет получить черно-белое изображение с четкими линиями) сгенерировала наиболее четкий результат. Данная функция выполняется для каждого пикселя. Параметры яркости, контрастности и порога для threshold выведены в интерфейс и могут быть изменены и применены для предпросмотра результата и оптимизации параметров.

2. Обработка изображения функцией поиска контуров. Данная функция выделяет объекты на основе перепада значений в пикселях. После первого шага обработки волокна имеют четкие контуры на фоне. Контуры проходят проверку на наличие внутренних контуров, чтобы вычесть внутренний контур из общего объекта (рис. 2).

3. Выделение отдельных волокон из объекта путем рекурсивного прохождения по полученному объекту слева-направо. Программа запоминает посещенные места. После получения первой маски программа определяет наличие несканированных мест и, если таковые имеются, повторяет алгоритм до тех пор, пока все части объекта не будут просканированы. В конце в полученных масках волокон пускаются лучи в некотором диапазоне углов. Из точки, самой отдаленной от начальной, выпуска-

ются новые лучи. Алгоритм закончит работу, когда расстояние между начальной и конечной точкой будет меньше заданного. Программа не учитывает волокна, расположенные на краю рабочей области, выходящие за ее пределы. Полученная прямая будет являться длиной волокна. Из-за небольшого количества точек, из которых преимущественно состоят ломаные, аппроксимация излишняя.

Полученные таким образом значения обозначают длину волокна в пикселях (рис. 3).



Рис. 2. Внешние (зеленые) и внутренние (желтые) контуры

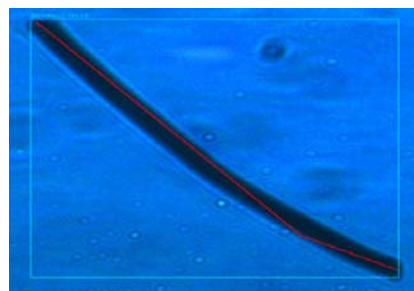


Рис. 3. Ломаная, определяющая длину

В настройках программы есть поле, которое соответствует количеству микрометров в пикселях. Таким образом, длина может быть рассчитана для фотографий разных размеров и масштабов. Единственным условие является то, что все фотографии, обрабатываемые при одном запуске программы, должны быть одинаковы по размерам и масштабу.

Для определения погрешности в программе создан функционал задания эталона и расчета погрешности на его основании. Эталон задается путем построения ломаной при помощи проставления точек на выбранном волокне. В качестве эталона можно указать любое из волокон. Эталон можно задавать для нескольких волокон сразу. При большем количестве эталонов точность определения погрешности будет выше.

При подсчете погрешности в статистике используют как средние числовые значения, так и медианные. В программе эти значения рассчитываются как для отдельных групп, так и для всех УВ в выборке. Если в конкретном диапазоне нет эталонных волокон, то для расчета относительной погрешности в данном диапазоне будет использовано значение погрешности по всем УВ. Программа сначала рассчитывает абсолютную погрешность для каждого УВ, у которого есть эталонное значение длины. В случае, если эталонное значение не найдено ни в одном из волокон, погрешность считается нулевой.

Абсолютная погрешность ΔL для волокна рассчитывается по формуле

$$\Delta L = |L_{\text{этал}} - L_{\text{прог}}|, \quad (1)$$

где $L_{\text{этал}}$ – длина, рассчитанная по введенному эталону; $L_{\text{прог}}$ – длина, полученная в результате работы программы.

Для расчета относительной погрешности волокна группируются по диапазонам в зависимости от длины. Относительная погрешность δ , %, вычисляется для диапазона на основании среднего значения абсолютной погрешности и среднего значения длины в данном диапазоне в соответствии с выражением:

$$\delta = \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=0}^k (\Delta L_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (L_{\text{прог } i})} 100 \%, \quad (2)$$

где k – количество волокон с эталонными значениями; n – количество волокон в диапазоне.

По формуле (2) выполняется расчет как для отдельных диапазонов, так и для всех волокон сразу. Полученные данные сохраняются в табличном процессоре Excel в виде таблицы, шапка которой представлена на рис. 4.

Длина	Количество	% от общего	Средняя (числовая)	Погрешность (числовая)	Средняя (медианная) ±	Погрешность (медианная)
-------	------------	----------------	-----------------------	---------------------------	--------------------------	----------------------------

Рис. 4. Шапка таблицы с результатами распределения длин волокон по диапазонам

Разработанная программа демонстрирует высокую эффективность автоматизации процессов лабораторного анализа измельченных УВ. Реализованный алгоритм обработки цифровых изображений, включающий коррекцию яркости и контрастности, выделение контуров, а также рекурсивное разделение волокон с последующим определением их длины, обеспечивает точное структурирование экспериментальных данных. Интеграция с табличным процессором Excel упрощает анализ фракционного состава и зависимости длины волокон от времени измельчения, что способствует оптимизации технологических параметров производства.

Использование эталонных значений и расчет относительной погрешности (на основе формул (1) и (2)) позволили минимизировать погрешность измерений, обеспечив достоверность результатов. Программа соответствует требованиям ГОСТ Р 57407-2017 и может быть адаптирована для исследований других типов волокнистых материалов.

Таким образом, применение подобных программных решений в промышленности и научной практике сокращает время обработки данных, повышает воспроизводимость экспериментов и открывает перспективы для дальнейшего развития методов анализа микроструктур композиционных материалов.

Л и т е р а т у р а

1. Волокна углеродные. Общие технические требования и методы испытаний : ГОСТ Р 57407-2017. – Утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 6 марта 2017 г. № 101-ст.
2. Костюкевич, В. В. Перспективные направления развития предприятия / В. В. Костюкевич // Нефтехимия – 2021 : материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 нояб. 2021 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2021. – С. XXVI–XXXII.
3. Костюкевич, В. В. Производство спецволокон и нитей с функциональными свойствами в ОАО «СветлогорскХимволокно» / В. В. Костюкевич // Нефтехимия – 2018 : материалы I Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и по нефтепереработке, Минск, 27–30 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 39–47.
4. ОАО «СветлогорскХимволокно». – Светлогорск, 2025. – URL: <https://www.sohim.by/> (дата обращения: 01.04.2025).

БИОПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭНДОПРОТЕЗОВ СУСТАВОВ: ОСОБЕННОСТИ РЕЦЕПТУРЫ И МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ**А. А. Кашперов, И. А. Галушкин, А. А. Жукова***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Ж. В. Кадолич

Обоснована целесообразность создания композиционного полимерного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного неорганическими микро-частицами: графитом и ферритом бария. Оптимизировано содержание наполнителя по критериям прочности. Показана целесообразность формирования в зоне трения физических полей, моделирующих биополе сустава. Предложена модель изнашивания разработанного полимерного композиционного материала трения для эндопротезов суставов.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, графит, феррит бария.

Все виды движений в искусственных суставах осуществляются с помощью узлов трения, которые должны работать *in vivo* много лет без отказов и ремонта. Однако, как показывает медицинский опыт [1], пары трения эндопротезов традиционно изготавливают из жестких конструкционных материалов, не позволяющих реализовать биофизические механизмы смазки, что приводит к необходимости повторных операций через существенно непродолжительный период времени. Среди возможных причин подобной ситуации можно выделить следующие. Во-первых, в используемых в настоящее время эндопротезах невозможно регулировать электрический потенциал поверхностей трения, вследствие чего остаются невостребованными уникальные трибологические свойства естественной смазки – синовиальной жидкости – как полярной смазочной среды. Во-вторых, при замещении эндопротезом патологически измененного сустава практически одномоментно ликвидируется непосредственный очаг патологии, однако в системе нервной регуляции сустава образуется так называемая «немая зона». Наличие большого искусственного образования – эндопротеза – не может остаться «незамеченным» для организма в целом. К сожалению, при хирургическом вмешательстве происходит нарушение не только целостности сустава, но и механизма функционирования естественных биофизических полей [2].

Цель работы – разработка полимерного материала трения для эндопротезов, моделирующего триботехнические характеристики и естественные механизмы изнашивания в суставах.

Материалы и методы проведения испытаний. Для решения поставленных задач исходили из следующих соображений: 1) основу материала должен составлять сертифицированный для ортопедии материал; 2) наполнителем, упрочняющим основу, должен быть твердый смазочный материал; 3) частицы наполнителя должны создавать в зоне трения физическое поле, способное регулировать распределение смазочного слоя и частиц износа. В экспериментах использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки Hostalen GUR 4120. Выбор материала матрицы обоснован его активным применением в медицинской практике [1, 3]. В качестве наполнителей были выбраны феррит бария (ФБ) и коллоидный графит марки С1. Следует отметить, что ФБ используется как носитель магнитного поля, способный к специфическому регулированию физического состояния смазочного слоя в зоне трения. С целью надежного закрепления неорганических частиц в полимерной мат-

рице (степень наполнения СВМПЭ смесью наполнителей составляла 1 : 1 по массе) на поверхности частиц наполнителя механохимическим способом создавали активные центры [4]. Активацию наполнителя осуществляли путем механического измельчения частиц в среде неорганической кислоты. Образцы для механических испытаний формировали методом «горячего» прессования при температуре 180 °С и выдержкой под давлением 10–12 МПа до полного остывания. Исследования деформационно-прочностных характеристик образцов при растяжении проводили на машине Instron.

Результаты и обсуждения. Введение в матрицу СВМПЭ 0,01–0,20 мас. % наполнителя практически не оказывает влияния на прочность композита: отклонение значений разрушающего напряжения при растяжении наполненных образцов от среднего значения для чистого СВМПЭ составляет ± 5 %. Однако даже столь незначительная концентрация неорганических частиц, согласно данным работы [5], будет способствовать улучшению трибологических характеристик, так как частицы коллоидного графита, являющегося твердой смазкой, снижают коэффициент трения. Кроме того, частицы ФБ будут способствовать созданию слабого магнитного поля, имитирующего биополе естественного сустава, которое будет оказывать существенное влияние на формирование смазочного слоя.

Согласно данным работы [6], изнашивание СВМПЭ в паре с гладким металлическим контртелом ($R_a < 0,02$ мкм) происходит *in vivo* по усталостному механизму. На этапе приработки микровыступы на поверхности трения полимерной детали первыми вступают в контакт с контртелом и изнашиваются. Под образующимися при трении микроучастками касания в полимерной детали концентрируются напряжения. Спустя некоторое время в зонах концентрации напряжений на глубине 10–40 мкм от поверхности трения в полимерной детали образуются микротрещины. При динамическом нагружении искусственного сустава происходит рост подповерхностных трещин, приводящий к откалыванию микронеровностей и значительному повреждению поверхности трения.

Использование при производстве эндопротезов композита на основе СВМПЭ, наполненного графитом и ФБ, изменяет механизм изнашивания. Интерес представляет также ориентация частиц ФБ вдоль поверхности трения образца, если спекание образцов проводить в поле соленоида. Механизм изнашивания такого материала можно описать с помощью следующей модели. В процессе приработки, когда интенсивно изнашиваются микровыступы контактирующих образцов, часть продуктов износа – частицы графита, ФБ и полимера – остается в зоне контакта и вовлекается в процесс трения, а намагниченные частицы ФБ локализуются в микрополостях зоны контакта. Более мелкие частицы графита заполняют пустоты в агломератах из частиц ФБ, образуя «третье тело», стабилизирующее процесс трения. Под микроучастками касания в полимерной детали концентрируются напряжения, но зона их действия значительно меньше из-за заполнения микрополостей в контакте агломератами ФБ и графита. Частицы наполнителя, выступающие из СВМПЭ на поверхность трения, являются своеобразными распределителями напряжений. Благодаря этому уменьшается толщина перенапряженного поверхностного слоя полимерной матрицы. Через некоторое время в зонах концентрации напряжений в подповерхностном слое полимерного образца трения могут возникнуть микротрещины. Уменьшение глубины залегания последних обусловлено увеличением площади фактического контакта и изменением напряженного состояния поверхностного слоя за счет «третьего тела». Откалывание микронеровностей при динамическом нагружении искусствен-

ного сустава с композитным вкладышем приводит к меньшему повреждению поверхности трения, а следовательно, к снижению скорости изнашивания. Наличие магнитного поля и токопроводящих частиц в зоне трения имплантированного эндопротеза определяет оптимальную ориентацию в смазочном слое полярных групп белково-полисахаридных комплексов и жидкокристаллических компонентов естественной смазочной среды (синовиальной жидкости). Это создает благоприятные предпосылки для снижения коэффициента трения в эндопротезе *in vivo*.

Литература

1. Пинчук, Л. С. Эндопротезирование суставов: технические и медико-биологические аспекты эндопротезирования / Л. С. Пинчук, В. И. Николаев, Е. А. Цветкова. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2003. – 308 с.
2. Барабаш, И. В. Изменение биоэлектрической активности головного мозга при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава / И. В. Барабаш, А. П. Барабаш, Н. И. Арсентьева // Вестник травматологии и ортопедии имени Н. Н. Приорова. – 2000. – № 1. – С. 36–41.
3. Кашперов, А. А. Материалы для имплантов опорно-двигательного аппарата человека / А. А. Кашперов, Ж. В. Кадолич // Исследования и разработки в области машиностроения : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. для студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2022. – С. 118–120.
4. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А. А. Берлин, С. А. Вольфсон, В. Г. Ошмян, Н. С. Ениколопов. – М. : Химия, 1990. – 240 с.
5. Механические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного неорганическими микрочастицами / Л. С. Пинчук, Ж. В. Кадолич, Е. А. Цветкова, Е. А. Сементовская // Пластические массы. – 2010. – № 12. – С. 49–53.
6. Cooper, J. R. Macroscopic and microscopic wear mechanisms in ultra-high molecular weight polyethylene / J. R. Cooper, D. Dowson, J. Fisher // Wear. – 1993. – Vol. 162-164. – P. 378–384.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПОРОШКА С ПОМОЩЬЮ ВИБРОДОЗАТОРА В ЗОНУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ

В. Г. Гаврилин

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

Научный руководитель С. В. Рогов

В ходе работы проведено экспериментальное исследование зависимости величины подачи и ее стабильности от угла наклона лотка дозатора и гранулометрических характеристик порошков. Изучена стабильность величины подачи порошка от количества циклов работы дозатора.

Ключевые слова: электромагнитная наплавка, подача, порошковые материалы, вибрация.

Сущность метода ЭМН заключается в совокупном одновременном воздействии на обрабатываемую поверхность детали и ферромагнитный порошок (ФМП), подаваемый в зону наплавки, нескольких видов энергии: электрического тока, внешнего магнитного поля, кругового магнитного поля электрического тока и механической энергии. Для метода характерно то, что обрабатываемая деталь является анодом, а обрабатывающий электрод-инструмент – катодом. При этом между электродом и изделием под действием тока возбуждается искровой заряд, в результате которого происходит расплавление и последующий перенос частиц ферромагнитного порош-

ка на упрочняемую деталь (анод). При этом помимо электрического тока на ФМП совокупно воздействуют внешнее магнитное поле, а также механическая энергия. Полученный поверхностный слой образует высокопрочное сцепление с основным материалом. Также возможно создание слоя с заданными физико-механическими свойствами.

Принципиальная схема ЭМН деталей типа тел вращения представлена на рис. 1.

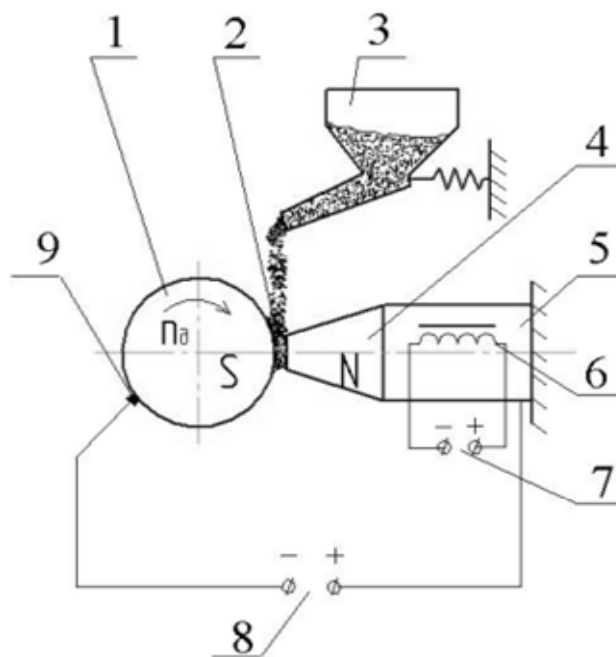


Рис. 1. Принципиальная схема однополюсной электромагнитной наплавки поверхности деталей типа тела вращения:

- 1 – упрочняемая деталь; 2 – ферромагнитный порошок; 3 – бункер-дозатор;
4 – полюсный наконечник; 5 – сердечник электромагнита;
6 – электромагнитная катушка; 7 – источник питания электромагнитной катушки; 8 – источник технологического тока; 9 – скользящий контакт

Цель работы – исследование влияния гранулометрического состава порошка на величину подачи и ее стабильности в процессе электромагнитной наплавки с применением вибробункера.

В работе была использована схема электромагнитного бункерного устройства, приведенная на рис. 2.

Во время работы установки вибрации, создаваемые автотрансформатором 11, воздействуют на лоток 2 вибрационного загрузочного бункера. Подвижность системы обеспечивается тем, что пластины 4 воспринимают эти вибрации, благодаря чему они совершают колебательные движения. Вибрация влияет на накопитель 1, что приводит к ссыпанию порошка в зону наплавки и его последующему оплавлению на детали 13. На порошок действуют силы инерции и трения, стремящиеся перемещать его частицы, а также сила тяжести. Регулируя амплитуду вибрации дозирующего устройства, можно контролировать необходимую подачу порошковых материалов в зону наплавки.

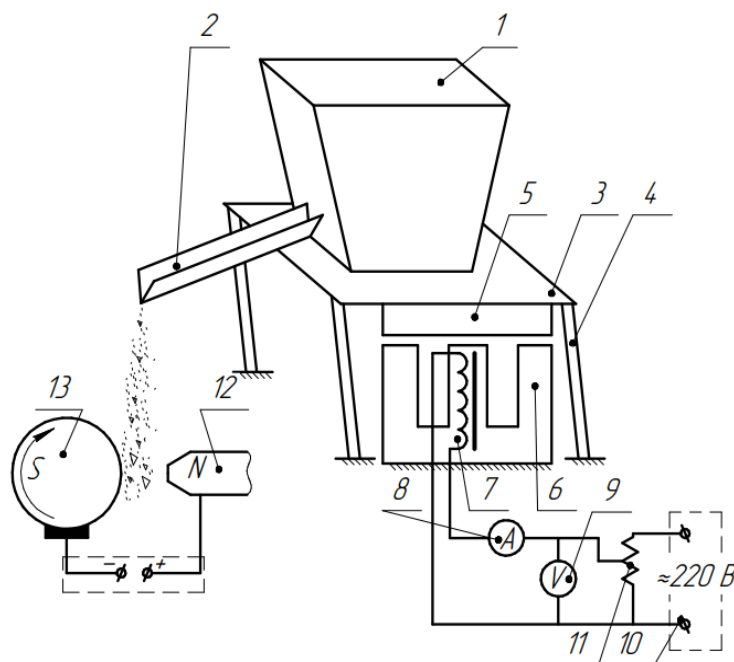


Рис. 2. Схема электромагнитного вибрационного загрузочного бункерного устройства с электромагнитным приводом:

1 – накопитель; 2 – лоток; 3 – днище накопителя; 4 – пластины;
5 – якорь; 6 – статор; 7 – электромагнитная катушка; 8 – амперметр;
9 – вольтметр; 10 – потенциометр; 11 – автотрансформатор;
12 – полюсный наконечник; 13 – заготовка

Разделение порошков на фракции осуществлялось посредством использования сит.

Взвешивание определялось с использованием лабораторных квадрантных весов ВЛК-500, предназначенных для определения массы вещества при проведении лабораторных анализов на различных производственных предприятиях.

При проведении эксперимента были использованы ферробор ФБ-6 ГОСТ 14848-69 (размер частиц – 315–400). Масса подаваемого порошка (величина подачи) определялась взвешиванием на аналитических весах ВЛК-500 с точностью до 0,001 г. Величину подачи порошка определяли усреднением результатов пяти опытов. Время подачи измерялось секундомером с точностью до 0,05 с.

Влияние вибрации на сыпучие материалы приводит к изменениям, которые зависят от интенсивности вибрации. С ее увеличением при амплитудных ускорениях, не превышающих ускорение свободного падения, сыпучее тело приобретает состояние подвижности, псевдотекучести. Это состояние называется псевдооживлением, при котором сцепление между частицами ослабевает, и они уплотняются, что приводит к уменьшению количества пор. Максимальное уплотнение достигается при ускорениях, близких к ускорению свободного падения.

Дальнейшее увеличение интенсивности вибрации приводит к тому, что частицы порошка теряют контакт с вибрирующим рабочим органом, связи между ними ослабевают и периодически разрываются; сыпучее тело переходит в состояние, напоминающее кипение.

На рис. 3, 4 приведены результаты исследования процесса вибротранспортирования порошков различного гранулометрического состава.

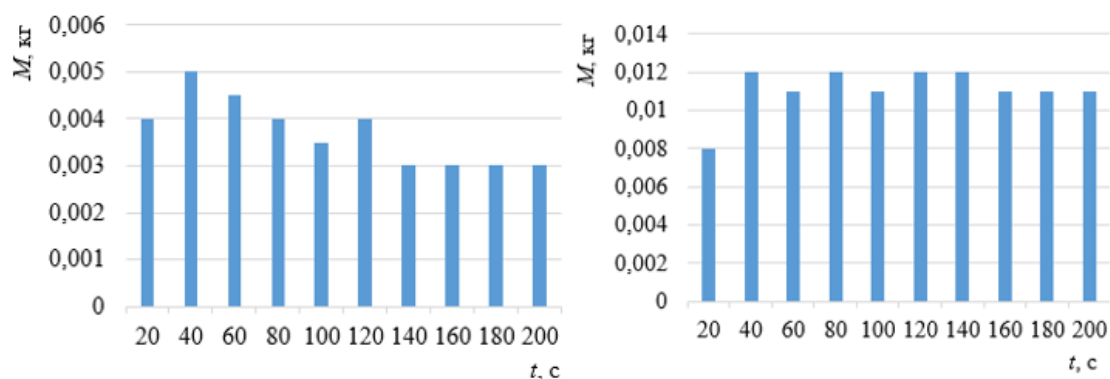


Рис. 3. Диаграммы стабильности величины подачи порошка M от времени работы дозатора: ФБ-6 (315), ФБ-6 (400). Цифра в скобках указывает на номинальный размер частиц порошка в мкм

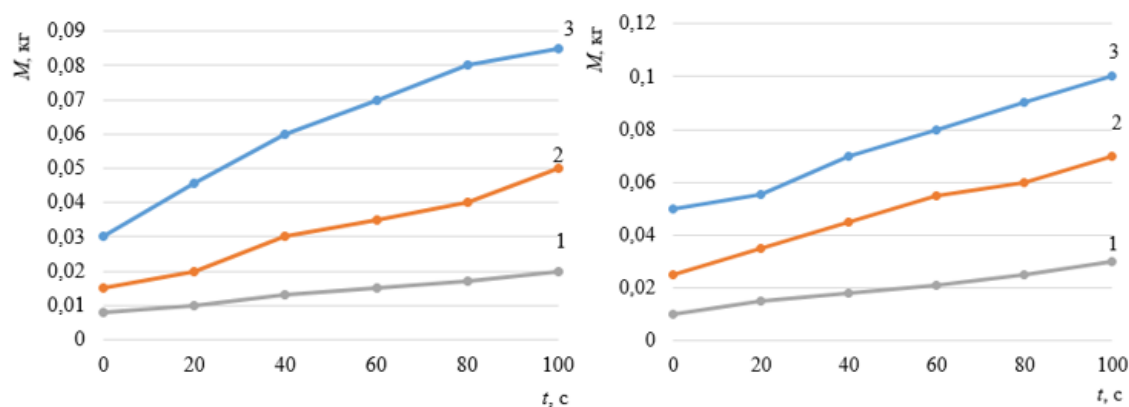


Рис. 4. Зависимость величины подачи M от времени работы устройства и угла наклона лотка устройства: ФБ-6 (315 мкм), ФБ-6 (400 мкм): 1 – угол наклона 10°; 2 – угол наклона 30°; 3 – угол наклона 50°

Основываясь на результатах, представленных в виде диаграмм на рис. 3, можно сделать вывод, что при длительной работе устройства достигается стабильность величины подачи за одинаковые промежутки времени (20 с). На графиках зависимости величины подачи от времени работы устройства и угла наклона лотка, показанных на рисунке 4, видно, что с увеличением угла наклона величина подачи порошков различного гранулометрического состава возрастает.

Литература

1. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск : Технопринт, 2000. – 267 с.
2. Блехман, И. И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике И. И. Блехман. – М. : Ленанд, 2017. – 216 с.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТИРОВАННЫХ И БОРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

С. В. Рогов

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

В ходе работы была оценена производительность и перспективность применения азотированных порошков при осуществлении магнитно-абразивной обработки. Изучены свойства и микроструктура применяемых порошков. Проведены сравнения порошковых материалов различного химического состава с целью установления их полирующей способности и прочих технологических свойств.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, порошковые материалы, шероховатость.

Магнитно-абразивная обработка (МАО) – абразивная обработка, осуществляемая при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле. Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса, уплотненная энергией магнитного поля, осуществляет абразивное воздействие на обрабатываемую деталь (рис. 1).

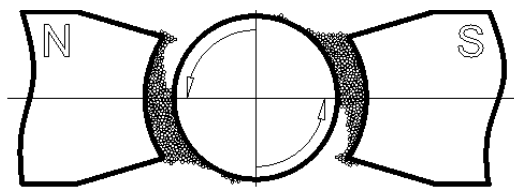


Рис. 1. Общая схема магнитно-абразивной обработки

Метод магнитно-абразивной обработки используется для повышения качества поверхности деталей и их точности. Процесс позволяет осуществлять снижение шероховатость Ra с 1,25–0,32 до 0,08–0,01 или с 10,00–2,5 до 0,32–0,08 мкм; сохранять геометрические размеры детали в пределах допуска предшествующей операции, исключать засаливание инструмента, что обеспечивает полирование мягких и вязких материалов.

Целью работы является оценка эффективности применения азотированных и борированных порошков на основе металлических отходов при магнитно-абразивной обработке.

В данном исследовании использовались диффузионно-азотированные и диффузионно-борированные порошки на основе мелкодисперсных отходов стали 16MnCr5 EN 10084, в качестве эталона применялся спеченный порошковый материал на основе железа и карбидов титана Fe–TiC. В исследованиях использовались порошки фракционного состава 25–50 мкм.

Азотирование порошков осуществляли в герметичном контейнере при температуре 560 °С в течение 12 ч. Исходный порошок мелкодисперсных отходов стали 16MnCr5 смешивался с насыщающей порошковой смесью в пропорции 1 : 5 по объему. После процесса азотирования полученный ферромагнитный абразивный порошок (ФАП) подвергался магнитной сепарации.

Толщину диффузионного слоя на частицах порошка оценивали с использованием оптической системы ПМТ-3 на микрошлифах, подготовленных в соответствии с ГОСТ 9.302-79. Металлографический анализ порошков проводили на микроскопах Neophot-21.

Шероховатость поверхности определяли прибором для измерения шероховатости «Сейтроник ПШ8-2».

Для исследований использовалась лабораторная установка для осуществления магнитно-абразивной обработки, предназначенная для обработки фасонных поверхностей.

Для установления технологических свойств новых порошковых материалов были проведены исследования их производительности и полирующей способности – способности обеспечивать достижение низкой шероховатости. Для сравнения были использованы диффузионно-борированный порошок на основе стали 16MnCr5 и спеченный порошковый материал Fe–TiC фракции 25–50 мкм. Результаты исследований приведены на рис. 2.

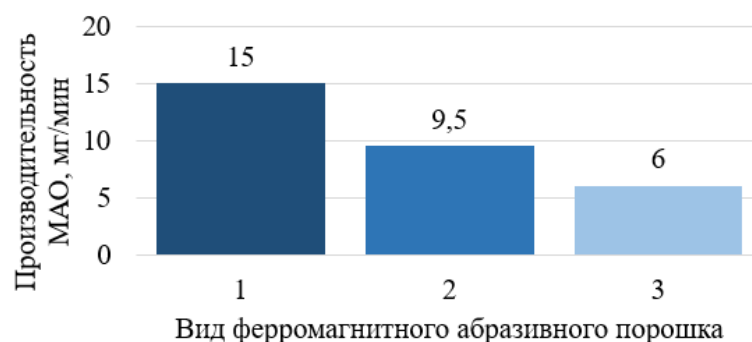


Рис. 2. Производительность ФАП в технологии МАО:
1 – борированный порошок; 2 – азотированный порошок;
3 – спеченный порошок Fe–TiC

На графике рис. 2 видно, что максимальную производительность 15 мг/мин обеспечивают порошковые материалы, получаемые диффузионным борированием отходов стали 16MnCr5. Это достигается вследствие высокой твердости поверхности частиц за счет боридов железа FeB (1450–1600 HV), что существенно выше твердости азотированного слоя (850–950 HV). Производительность азотированных порошковых материалов составила 9,5 мг/мин и оказалась существенно выше спеченного порошка-эталоны Fe–TiC, который показал производительность 6 мг/мин. Это объясняется тем, что у диффузионно-борированных и азотированных порошковых материалов вся поверхность частицы обладает высокой твердостью и является режущей частью, а у спеченного материала Fe–TiC режущей способностью обладают только включения TiC, распределенные по поверхности частицы. Кроме того, отличительной особенностью азотированных слоев является сохранение их твердости при высоких температурах.

Таким образом, несмотря на то, что азотированные ферромагнитные абразивные порошки показали производительность ниже диффузионно-борированных, они оказались эффективнее наиболее распространенного в технологии магнитно-электрической обработки спеченного материала Fe–TiC за счет большей площади режущей поверхности и применение их в технологии МАО целесообразно.

Для оценки полирующей способности исследуемых порошковых материалов были проведены исследования шероховатости обработанной поверхности после МАО с использованием различных ФАП. Исходная шероховатость образцов составляла $Ra\ 1,25\ \mu\text{м}$. Результаты исследований приведены на рис. 3.

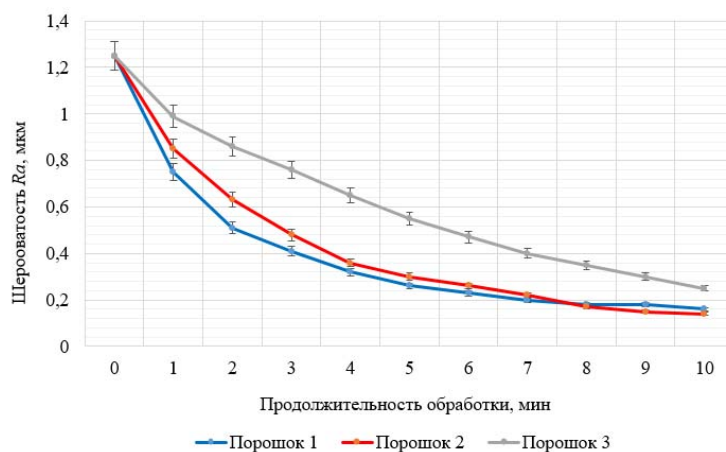


Рис. 3. Изменение шероховатости обработанной поверхности с использованием различных ФАП фракции 25–50 мкм

Как видно из графика на рис. 3, диффузионно-борированный и азотированный порошки (порошок 1 и 2) обеспечивают снижение шероховатости поверхности образца с $Ra\ 1,25\ \mu\text{м}$ до $Ra\ 0,32 \pm 0,03\ \mu\text{м}$ в течение 3 минут, а продолжение обработки до 9–10 минут позволяет достичь шероховатости $Ra\ 0,16 \pm 0,02\ \mu\text{м}$. Порошок-эталон Fe–TiC позволяет достичь шероховатости $Ra\ 0,32 \pm 0,03\ \mu\text{м}$ в течение 9 минут, что обусловлено его меньшей производительностью, а продолжение обработки позволяет достичь шероховатости $Ra\ 0,20 \pm 0,02\ \mu\text{м}$. Лучшая полирующая способность диффузионно-борированного и азотированного ФАП объясняется сохранением их режущей способности в течение длительного времени, так как даже при разрушении частиц таких порошков они сохраняют твердую поверхность. У спеченного порошкового материала Fe–TiC (порошок 3) в течение обработки происходит выкрашивание твердой фазы TiC, что приводит к прекращению микрорезания обрабатываемой поверхности и не обеспечивает дальнейшее снижение шероховатости. Ввиду этого достичь снижения шероховатости с $Ra\ 1,25\ \mu\text{м}$ до $Ra\ 0,16 \pm 0,02\ \mu\text{м}$ при МАО с использованием спеченного порошкового материала Fe–TiC можно только с заменой ФАП в процессе обработки, что существенно снижает производительность процесса.

Литература

1. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск : Технопринт, 2000. – 267 с.
2. Пантелеенко, Ф. И. Новые диффузионно-борированные материалы для магнитно-абразивной обработки / Ф. И. Пантелеенко, Е. Ф. Пантелеенко, В. М. Быстренков // Перспективные материалы и технологии : монография : в 2 т. ; под ред. акад. В. В. Клубовича. – Витебск, 2017. – С. 241–254.
3. Ящерицын, П. И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын, М. Т. Забавский. – Минск : Наука и техника, 1988. – 272 с.
4. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чеми-сов. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.

**МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА
ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ****А. И. Иванов**

*Республиканское инновационное унитарное предприятие
«Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель В. М. Асташинский

Представлены результаты электролитно-плазменной цементации образцов из технически чистого титана BT1-0. Показано, что в результате обработки формируется цементованный слой толщиной до 260 мкм. Максимальная твердость приповерхностной зоны увеличивается до трех раз по сравнению с исходным значением. Отмечено, что наблюдается значительное снижение коэффициента трения, который уменьшается в 4,6 раза, что свидетельствует о повышении износостойкости поверхности обработанных образцов.

Ключевые слова: электролитно-плазменный нагрев, титан, цементация, диффузионный слой, твердость, коэффициент трения.

В настоящее время все более широкое распространение получают методы модификации поверхностных свойств материалов, основанные на высокоэнергетическом воздействии. Одним из таких методов является электролитно-плазменное упрочнение. Его суть заключается в осуществлении процесса электролитно-плазменного нагрева в насыщающей среде (электролите). Благодаря достижению высоких температур (до 1200 °С) и скоростей нагрева (до 250 °С /с), данный метод позволяет реализовывать процессы химико-термического упрочнения, такие как азотирование, цементация, нитроцементация, борирование и другие в зависимости от состава используемого электролита [1].

В работе рассматривалось влияние электролитно-плазменной цементации (ЭПЦ) на механические и трибологические свойства титана. В качестве образцов были использованы пластины изготовленные из технически чистого титана BT1-0 размерами 10 × 10 × 1 мм. Все исследования проводились на базе государственного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». ЭПЦ осуществлялась в электролите, содержащем по 10 % глицерина и аммиака водного. Температура электролита поддерживалась на уровне 20 °С с точностью до 2 °С. Выбор температуры электролита обуславлен результатами исследований, представленных в работе [2]. Время обработки составляло 5 мин. Рабочее напряжение устанавливалось в диапазоне от 200 до 260 В с шагом в 20 В. Величина рабочего напряжения контролировалась при помощи осциллографа марки OWON XDS3102A. После ЭПЦ охлаждение образцов проводилось в рабочем электролите, без их извлечения, путем прекращения подачи напряжения.

В результате ЭПЦ на поверхности образцов образуется оксидный слой толщиной от 10 до 20 мкм. С повышением напряжения толщина диффузионного слоя увеличивается. Разница между его толщиной при 200 В и при 260 В составляет 1,4–1,6 раза. Вместе с тем следует отметить, что данный слой обладает низкими адгезионными свойствами, в результате чего он является хрупким, несплошным и зачастую быстро отслаивается от подложки.

Под оксидным слоем непосредственно в приповерхностной зоне образцов формируется диффузионный (цементованный) слой. Для измерения его микротвердости изготавливались микрошлифы. Образцы разрезались по среднему сечению, запрессовывались в компаунд, затем шлифовались с использованием шлифовальной бума-

ги и полировались алмазными пастами. Измерения проводились на микротвердомере AFFRI MVDM8 по методу Виккерса при нагрузке 0,1 кг и времени воздействия индентора 15 с. Твердость измерялась в центре образца, начиная с глубины 10 мкм от его поверхности и далее по сечению. Толщина диффузионного слоя устанавливалась по глубине, на которой величина микротвердости снижалась до уровня исходного (необработанного) материала. Полученные результаты измерений микротвердости и толщины диффузионного слоя представлены на рис. 1.

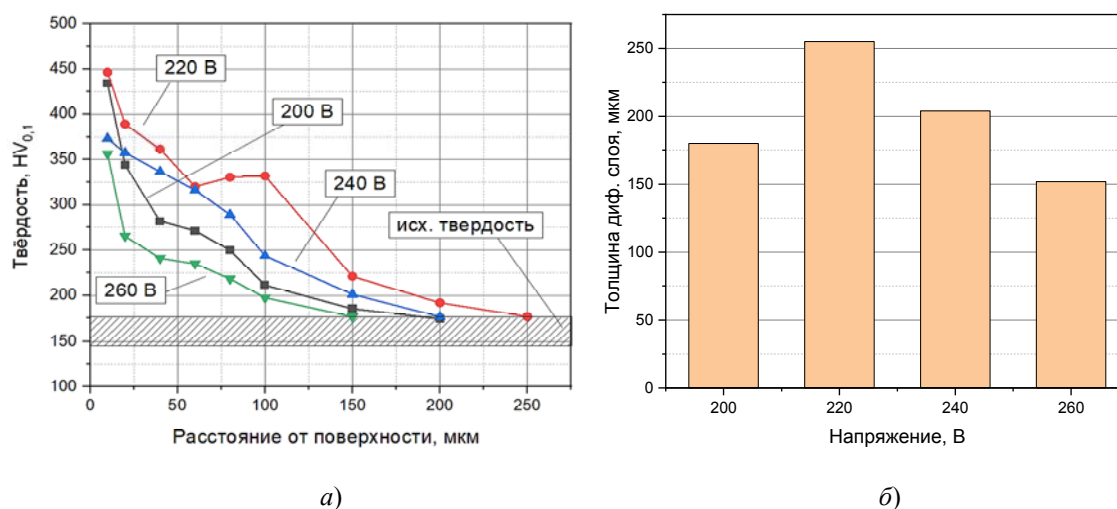


Рис. 1. Распределение микротвердости в поверхностном слое образцов (а) и толщина образующегося диффузионного слоя (б) после ЭПЦ

В результате ЭПЦ наибольшую толщину и твердость цементованный слой приобретает при обработке при 220 В. Увеличение напряжения выше этого значения приводит к снижению толщины и твердости слоя, что связано с избыточным нагревом образцов и выходом за оптимальный температурный диапазон цементации титана ВТ1-0. Максимальная твердость наблюдается в приповерхностной зоне на расстоянии 10 мкм от края и составляет 450 HV, что в 2,8–3 раза выше твердости исходных образцов.

Для исследования трибологических характеристик поверхности образцов после ЭПЦ были проведены испытания на трибометре FT-3 по схеме с возвратно-поступательным движением индентора. В качестве индентора применялся шар из нитрида кремния диаметром 6 мм. Во время испытаний индентор совершал возвратно-поступательные движения, передавая заданную нагрузку неподвижно закрепленному в держателе образцу. Нагрузка составляла 220 г, скорость прохода – 3000 мм/мин, расстояние за цикл – 10 мм, общее пройденное расстояние – 200 м. На основе полученных данных были построены графики, отражающие изменение глубины канавки износа и коэффициента трения в зависимости от пути, пройденного индентором (рис. 2). Также предварительно было установлено, что коэффициент трения для необработанных образцов равен 0,55–0,6.

Для образцов, подвергшихся ЭПЦ при напряжении 200 В при температуре электролита 20 °С (рис. 2), установлено, что индентор достигает подложки после прохождения 82 м. В этом случае коэффициент трения оксидного слоя составляет 0,04–0,05. С увеличением рабочего напряжения расстояние, необходимое индентору для достижения подложки, сокращается: при 220 В оно составляет 64 м, при 240 В – 45 м,

а при 260 В – 7 м. Коэффициент трения при этом остается в пределах 0,03–0,05. Для образцов после ЭПЦ при 260 В установить четкое значение коэффициента трения не удалось, что может быть связано с тем, что образовавшееся покрытие является слишком хрупким и в процессе исследований оно не стиралось индентором, а отслаивалось.

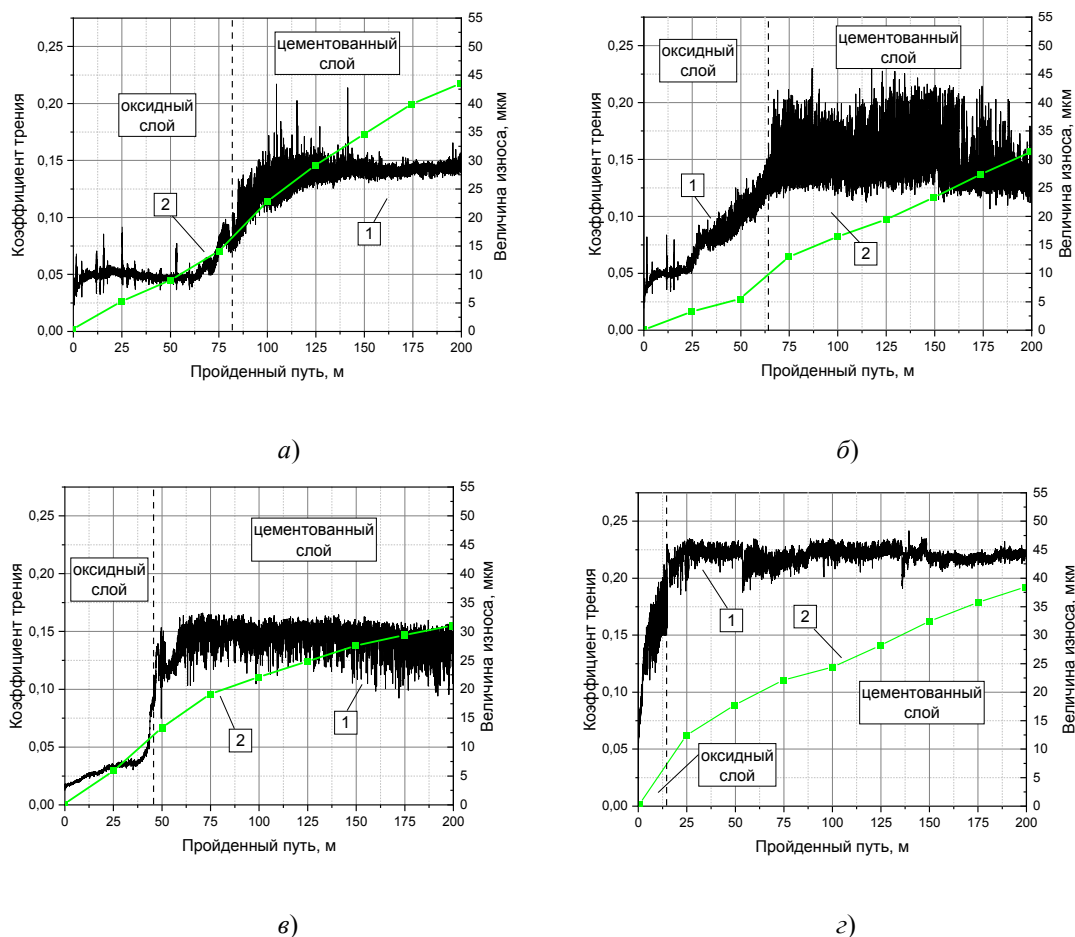


Рис. 2. Изменение коэффициента трения (1) и глубины канавки износа (2) в зависимости от пройденного индентором пути для образцов, обработанных при различном рабочем напряжении:
а – 200 В; б – 220 В; в – 240 В; г – 260 В

За оксидным слоем, как было отмечено выше, следует зона диффузионного упрочнения подложки атомами углерода. Коэффициент трения этой зоны изменяется от 0,15 для образцов, обработанных при 200 В, и до 0,13–0,14 – для образцов, обработанных при 220–240 В. Повышение напряжения до 260 В приводит к увеличению данного показателя до 0,22. Полученные данные демонстрируют обратную корреляцию с толщиной диффузионного слоя, а именно, при увеличении напряжения с 200 до 220 В происходит рост толщины диффузионного слоя и уменьшение коэффициента трения. Дальнейшее повышение напряжения до 260 В приводит к снижению толщины диффузионного слоя и повышению коэффициента трения.

Литература

1. Plasma electrolysis for surface engineering / A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland [et al.] // Surface and Coating Technologies. – 1999. – Vol. 122. – P. 73–93.
2. Иванов, А. И. Влияние температуры электролита на толщину и твердость модифицированного слоя при электролитно-плазменном упрочнении титановых сплавов / А. И. Иванов, А. Ю. Королёв // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : тез. докл. 38-й Междунар. науч.-техн. конф. в рамках междунар. специализир. выставки «Металлообработка–2024», Минск, 11 апр. 2024 г. / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2024. – С. 37–38.

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ КАТИОНАМИ
МОНОЭТАНОЛАММОНΙΑ И ЭТИЛЕНДИАММОНΙΑ
НА СТРУКТУРУ И СВЕТОПОГЛОЩЕНИЕ
МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЕНОК**

В. С. Будник, А. К. Тучковский

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск*

Научный руководитель И. А. Врублевский

Продemonстрированы результаты исследований металлоорганического галогенплюмбатного йодного перовскита до и после включения в его состав аминоксодержащих соединений (алкиламмониевых йодидов) с различным строением углеродного заместителя. Отмечено, что модификация добавками солей раствора перовскита приводит к поверхностным и оптическим изменениям при исследовании перовскитных образцов. В зависимости от конкретного соединения, которым был допирован исходный перовскит, выявляются изменения в структуре поверхности пленок, выраженные в наличии перовскитных микрокристаллов либо зерен разного размера, а также в характере промежутков между ними. Показано, что оптические изменения определяются изменением значений светопоглощения в зависимости от структуры аминного соединения, включенного в первоначальный перовскитный раствор.

Ключевые слова: перовскит; допирование; алкиламмониевые йодиды; светопоглощение; видимый спектр.

Внимание ученых уже давно привлечено к разработке эффективных средств преобразования солнечной энергии в электроэнергию. Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу обусловлен реальной возможностью создания относительно стабильных, недорогих и простых в изготовлении солнечных элементов с относительно высоким коэффициентом преобразования энергии. По этим причинам в фотовольтаике востребованы гибридные металлоорганические перовскитные элементы [1].

Кристаллическая структура гибридных галогенплюмбатных металлоорганических перовскитов вида $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ рассматривается как неорганический блок соединенных по вершинам октаэдрических соединений PbI_6 , в кубооктаэдрических пустотах которого расположены метиламмониевые органические катионы CH_3NH_3^+ , связанные с анионной подрешеткой за счет электростатического взаимодействия (рис. 1, а) [2].

Управляемая кристаллизация имеет практическое значение для получения высококачественных тонких пленок перовскита с уменьшенным количеством структурных дефектов. Такие доноры электронных пар, как азот, кислород и сера, в качестве посторонних добавок связывают катионы металлов в перовскитах и влияют на латеральный рост кристаллитов. Образцы, модифицированные N- и O-донорами,

показывают более компактную морфологию вместе с повышенной кристаллическостью и размером зерен. Остаточные молекулы пассивируют мелкие дефекты в границах зерен и приводят к подавлению рекомбинации носителей заряда. В некоторых исследованиях использовались амины с длинными углеводородными хвостами для морфологической регуляции тонких пленок перовскита, но данные соединения показали неудовлетворительные результаты [3].

Цель работы – изучение влияния модифицирования перовскитного металлорганического материала аминными соединениями, имеющими различные радикальные заместители, на морфологию и оптические свойства пленок.

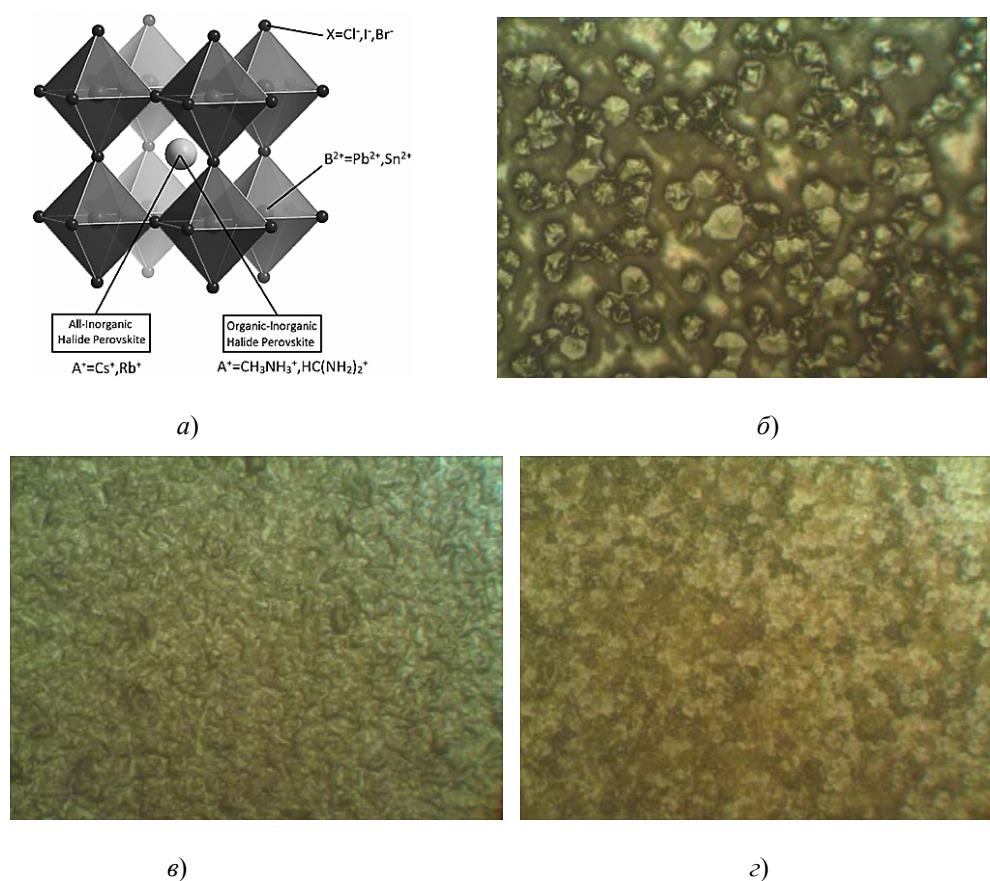


Рис. 1. Кристаллическая структура перовскита (а); морфология пленок исходного перовскита (б), модифицированного при помощи моноэтаноламмониевого (в) и этилендиаммониевого (з) соединений

В выполненном эксперименте использовались добавки на основе моноэтаноламина и этилендиаммина, концентрации которых равны 40 г/л. Пленки толщиной 0,8 мкм были получены центрифугированием (500 об/мин) с последующим отжигом при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 мин. Жидкофазный прекурсор перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ получали смешиванием иодида метиламмония $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ с иодидом двухвалентного свинца PbI_2 в диметилформамиде (молярное соотношение компонентов 1 : 1), необходимые амины в виде иодидаммониевых солей добавляли при перемешивании небольшими порциями. Концентрация йодного перовскита в диметилформамиде составляла 120 г/л. Структура покрытий исследована на оптическом микроскопе

МКИ-2М при увеличении $\times 500$, светопоглощение (A , а. у.) – на спектрофотометре МС-122 в области длин волн (λ , нм) 380–1000 нм.

В исходном перовските пленка имеет черный цвет. Обнаруживаются отдельные крупные кристаллиты неправильной шестиугольной формы с вогнутым центром, размеры которых варьируются от 8,14 до 23,56 мкм (средний размер – 15,70 мкм) (рис. 1, б). При модификации перовскита при помощи моноэтаноламмониевой соли покрытие приобретает темно-красный цвет и кристаллическую структуру с большим количеством пустот. Образуются многочисленные вытянутые включения длиной 5,50–14,00 мкм со средней длиной 12,0 мкм (рис. 1, в). При добавлении этилендиаммониевой соли пленки становятся оранжевыми и сплошными. Образуются крупные зерна диаметром 0,84–2,40 мкм, различимы отдельные округлые скопления зерен 6,30–6,50 мкм (рис. 1, г).

При исследовании показателей светопоглощения исходного перовскита в начале исследуемого диапазона длин волн наблюдается падение показателей от $A = 0,93$ а. у. ($\lambda = 380$ нм) до перегиба в значении $A = 0,91$ а. у. при $\lambda = 472$ нм (фиолетовая и синяя области видимого спектра), которое сменяется резким повышением в остальной области видимого спектра до значения $A = 0,95$ а. у. при $\lambda = 758$ нм (второй перегиб). В инфракрасной области показатель поглощения после второго перегиба понижается до $A = 0,90$ а. у. (рис. 2, кривая 1). При содержании в перовските моноэтаноламмония иодида поглощение значительно падает из-за увеличения количества пустот в пленке (рис. 2, кривая 2). Показатель поглощения падает от $A = 0,70$ а. у. при $\lambda = 380$ нм до перегиба при $A = 0,61$ и $\lambda = 506$ нм (голубая область видимого спектра), затем проходит через второй перегиб при $A = 0,54$ и $\lambda = 600$ нм (оранжевый диапазон) и остается практически неизменным на дальнейшей области видимого спектра. Максимальные значения A от 3,40 до 3,84 а. у. для перовскита, модифицированного катионом этилендиаммония, наблюдаются при диапазоне λ 380–434 нм, что соответствует фиолетовой области спектра. Затем происходит резкое падение до $A = 1,90$ а. у. при $\lambda = 564$ нм (зеленая область) с дальнейшим плавным понижением ($A = 1,57$ а. у., $\lambda = 1000$ нм) (рис. 2, кривая 3). Вышеуказанные спектральные изменения объясняются устранением пустот в модифицированной пленке и внедрением этилендиаммониевого катиона в кристаллическую решетку перовскита за счет реакции замещения.

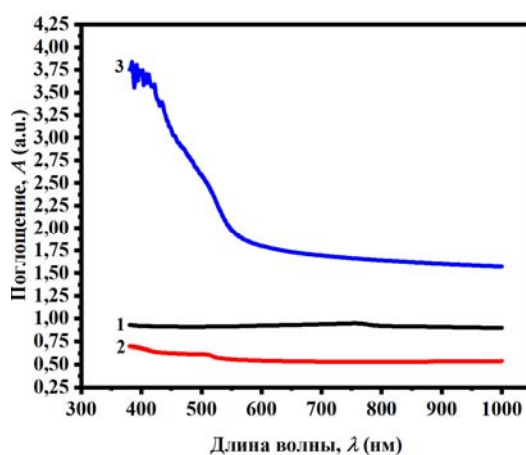


Рис. 2. Спектры поглощения исходного перовскита (1), модифицированного при помощи моноэтаноламмониевого (2) и этилендиаммониевого (3) соединений

Таким образом, модификация металлоорганического перовскита при помощи катиона этилендиаммония приводит к повышению качества покрытий.

Литература

1. McNelis, B. The Photovoltaic Business: Manufactures and Markets. / B. McNelis // Series on Photoconversion of Solar Energy. – 2001. – N 1. – P. 713.
2. El-Mellouhi, F. Hydrogen Bonding and Stability of Hybrid Organic–Inorganic Perovskites / F. El-Mellouhi [et al.] // Chem. Sus. Chem. – 2016. – Vol. 9, N 18. – P. 2648–2655.
3. Амины с длинными «хвостами» повысили стабильность перовскитных солнечных элементов. – URL: https://elementy.ru/novosti_nauki/433621/Aminy_s_dlinnymi_khvostami_povysili_stabilnost_perovskitnykh_solnechnykh_elementov (дата обращения: 08.02.2025).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН МИКРОСТРУКТУРЫ БУНТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

С. А. Савченко

Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», г. Жлобин

Д. С. Чубарев

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Представлены результаты исследования влияния диаметра бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 на формирование микроструктуры при двухстадийном охлаждении в линии Стелмор. Определена исходная микроструктура для профилей. Ø 5,5–18,5 мм и представлен результат ее трансформации после проведения сфероидизирующего отжига.

Ключевые слова: подшипниковая сталь, сфероидизирующий отжиг, исходная структура, пластинчатый перлит, маятниковый (циклический) отжиг, цементитные пластины и глобули.

Цель работы – провести анализ изменения микроструктуры раската из непрерывнолитой заготовки шарикоподшипниковой стали ШХ-15 для определения влияния степени обжата на структурные изменения.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- изучение и анализ исходной микроструктуры катанки;
- изучение и анализ исходной микроструктуры катанки после сфероидизирующего отжига;
- анализ результатов и формулирование выводов.

Методика исследования включает:

- 1) отбор проб и анализ первичной микроструктуры катанки Ø 5,5–18,5 мм после поточного охлаждения на линии Стелмор;
- 2) отбор проб и анализ микроструктуры катанки Ø 5,5–18,5 мм после сфероидизирующего отжига;
- 3) сравнительный анализ микроструктуры.

Объектом исследования в работе является технологический процесс бунтовой прокатки шарикоподшипниковых (ШХ) сталей.

Катанка диаметром 6,5 мм прокатывается в линии катанки из непрерывнолитой заготовки 250×300 или 140×140 мм согласно универсальной схеме калибровке [1], применяемой для прокатки сортовых и арматурных профилей. С загрузочных решеток НЛЗ нагреваются в методической печи до температуры 1100°C и прокатываются во всех группах клетей. В конце линии осуществляется двухстадийное охлаждение, позволяющее получить требуемую микроструктуру [2].

Для получения равномерной микроструктуры и стабильного ОБС при проведении с маятникового (циклического) сфероидизирующего отжига был разработан усовершенствованный режим поточной термообработки бунтового проката на линии Стелмор. В основе разработки были положены результаты собственных исследований [3, 4] и аналогичных научных работ. Изменения касались ускоренного охлаждения витков в начале транспортера витков линии Стелмор с последующей выдержкой под термоэкранами (термоизолирующими крышками). Поскольку при быстром снижении температуры ниже 727°C скорость превращения увеличивается и достигает максимума при $\sim 550^\circ\text{C}$, разработанный режим должен увеличить время и полноту структурных превращений с уменьшением межпластинчатого расстояния в перлите. Начальная температура охлаждения в зоне виткообразователя была принята равной $870 \pm 20^\circ\text{C}$ (несколько выше температуры A_{C3}) как наиболее эффективной для формирования мелкодисперсной структуры без образования заметной карбидной сетки при разных скоростях охлаждения.

Исходная микроструктура проката диаметром 6,5 мм при таком режиме поточной термообработки была мелкодисперсной перлитной с межпластинчатым расстоянием $0,126\text{--}0,235$ мкм и размером пластин цементита не более $0,8$ мкм.

По размеру зерен отчетливо определялись 2 зоны (рис. 1): периферийная (толщина $1,1\text{--}1,4$ мм), мелкозернистая и центральная крупнозернистая. Поэтому в дальнейших исследованиях и анализе структурных превращений было принято выполнять их для обеих зон.



Рис. 1. Микроструктура катанки из стали ШХ15 диаметром 6,5 мм, $\times 50$

После прокатки и поточного охлаждения бунтового проката диаметром 6,5 мм из подшипниковой стали ШХ15 были обеспечены все качественные характеристики по ГОСТ 801, в том числе и повышение качественных показателей ОБС (минимизация участков остаточного пластинчатого перлита) (рис. 2).

Учитывая получение мелкодисперсной перлитной структуры на линии Стелмор и применяемый далее циклический тип сфероидизирующего отжига бунтового проката диаметром 6,5 мм, представляет интерес изучение влияния исходной микроструктуры разных размеров сечений на полноту структурных превращений при сфероидизации пластин цементита в глобули.

4. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев, С. А. Савченко, И. А. Панковец [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. – DOI 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73
5. Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко, А. Б. Сычков // Черные металлы. – 2024. – № 4. – С. 32–38. – DOI 10.17580/chm.2024.04.05

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЛОЧЕНИЯ В ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ЗОНЕ ВОЛОКИ

Д. В. Деревянко

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Отмечено, что при проектировании и совершенствовании процессов волочения металлической проволоки и прутков необходимо иметь возможность аналитического расчета значения усилия волочения. Традиционно при расчете величины усилия волочения основной упор делается на определение усилия волочения через основную деформирующую зону волоки. Однако величина практического усилия волочения также зависит и от сопротивления протяжки металла через цилиндрическую калибрующую зону волоки. Представлена зависимость для аналитического расчета напряжения волочения через коническую деформирующую зону волоки.

Ключевые слова: волочение, волока, деформирующая зона волоки, формула для напряжения волочения.

Величина напряжения волочения в деформирующей зоне волоки используется для аналитического определения значения усилия проволоки и прутков [1–3]. Усилие волочения зависит от сопротивления протяжки металла через деформирующую, чаще коническую, зону волоки и через цилиндрическую калибрующую зону волоки. Основная доля величины усилия волочения приходится на деформирующую зону волоки. Поэтому аналитическая оценка значения напряжения волочения в деформирующей зоне волоки является актуальной.

Для получения зависимости для расчета напряжения волочения в деформирующей зоне волоки рассмотрим схему волочения заготовки круглого сечения через коническую деформирующую зону волоки (рис. 1).

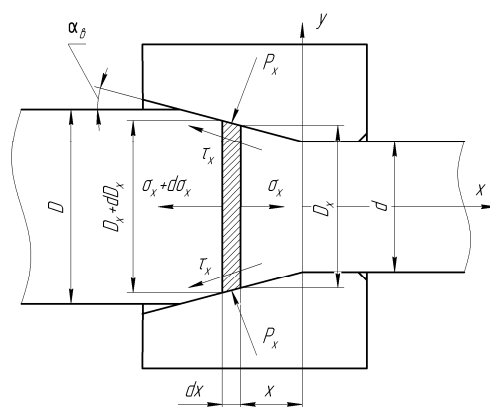


Рис. 1. Схема напряженного состояния в деформирующей
конической зоне волоки

На выделенный элементарный объем очага деформации длиной dx (рис. 1) действуют осевые напряжения σ_x и $(\sigma_x + d\sigma_x)$, нормальное контактное напряжение P_x и касательное контактное напряжение τ_x . Диаметр заготовки перед волочением D , после волочения – d , α_b – полуугол деформирующей зоны волоки.

Получено дифференциальное уравнение равновесия приведенных сил, действующих на выделенный элементарный объем очага деформации длиной dx в очаге деформации волочения:

$$\sigma_x dD_x + \frac{D_x}{2} d\sigma_x + P_x \cdot dD_x + \tau_x \cdot \frac{dD_x}{\operatorname{tg}(\alpha_b)} = 0. \quad (1)$$

Выполнено решение уравнения (1) с учетом зависимости для контактного трения при волочении:

$$\tau_x = f \cdot P_x. \quad (2)$$

Исходя из условия пластичности для очага деформации:

$$P_x = \sigma_T - \sigma_x, \quad (3)$$

где σ_T – пред текучести металла проволоки.

В результате интегрирования уравнения (1) определена константа интегрирования из граничного условия при $D_x = D$, $\sigma_x = \sigma_0$:

$$C = \frac{\sigma_0 \cdot a - \sigma_T \cdot (1+a)}{D^{2a}}, \quad (4)$$

$$a = f \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_b),$$

где σ_0 – напряжение противонапряжения волочения; f – коэффициент контактного трения.

В результате решения уравнения (5) получена зависимость для напряжения волочения в деформирующей зоне волоки:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_T \cdot (1+a)}{a} \left[1 - \left(\frac{D_x}{D} \right)^{2a} \right] + \sigma_0 \cdot \left(\frac{D_x}{D} \right)^{2a}. \quad (5)$$

Зависимость (5) описывает закон распределения осевых напряжений вдоль очага деформации. Если в формулу подставить условие $D_x = D$, то получим значение напряжений волочения заготовки через деформирующий канал волоки без учета волочения в калибрующей зоне.

Литература

1. Перлин, И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, И. З. Ерманок. – М. : Металлургия, 1971. – 448 с.
2. Теория и технология волочения : учеб. пособие / Б. Н. Марьин, С. Б. Марьин, В. В. Куриный, Е. А. Тютин. – 2-е изд., доп. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2006. – 85 с.
3. Коковихин, Ю. И. Технология сталепроволочного производства : учеб. для вузов / Ю. И. Коковихин. – Киев, 1995. – 608 с.

ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Д. А. Сыч, К. В. Ефременко

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

Научные руководители: И. Ю. Ухарцева, С. Н. Бобрышева

Приведен анализ тенденций в развитии аддитивных технологий. Представлена характеристика современных методов 3D-печати, отмечены их преимущества и недостатки, области применения. Проанализированы особенности композиционных материалов, применяемых в аддитивных технологиях.

Ключевые слова: композиционные материалы, аддитивные технологии, 3D-печать.

Современные материалы подразделяются на две ключевые категории: пористые и монолитные. Каждая из них обладает уникальными структурными характеристиками и функциональными свойствами, определяющими их использование в науке и технике.

Целью настоящего исследования является анализ особенностей свойств современных пористых материалов, основных путей их создания и областей применения.

Пористые материалы представляют собой твердые тела, имеющие внутреннюю структуру в виде слипшихся или сросшихся частиц разной формы и размеров, между которыми образуются поры, которые могут быть открытыми или закрытыми. Система закрытых пор внутри тела в отличие от открытых не сообщается с внешней средой. Подобная структура обуславливает их уникальные свойства.

Согласно современной классификации, пористые тела по своей структуре делят на корпускулярные и губчатые. Корпускулярные пористые тела, или пористые тела первого типа, (например, силикагели) состоят из сросшихся частиц разной формы и размера, а порами являются промежутки между этими частицами и их ансамблями. В губчатых телах – телах второго типа (например, пористых стеклах) невозможно выделить отдельные первичные частицы, и поры в них представляют собой сеть каналов и полостей различной формы и переменного сечения. Такая структура значительно влияет на физико-химические характеристики материала. Комбинированные материалы сочетают в себе черты обоих типов пористости, что позволяет добиться еще большего разнообразия свойств и применений. В большинстве случаев пористая структура задается при синтезе и зависит от условий его проведения. Модифицирование материалов после их синтеза может также приводить к изменению размера пор [1].

Наиболее распространенный метод получения пористых материалов – осаждение, сопровождающееся переходами золь-гель-ксерогель. Каждый из этих переходов вносит определенный вклад в общий процесс порообразования. Для получения оксидных пористых материалов применяют термическое разложение различных соединений: гидроксидов, карбонатов, оксалатов, гидридов и т. д. В результате этого процесса получают высокодисперсные вещества с широко развитой системой капилляров.

Методом избирательного растворения отдельных компонентов вещества с помощью химических реакций получают пористые металлические катализаторы (никелевый, кобальтовый, железный), а также пористые стекла

Метод выжигания одного из компонентов, например, составляющей гидрогелей различных гидроксидов используется для формирования пористости некоторых сорбентов (силикагели) с пористой структурой строго определенного размера.

Для получения пористой структуры при подготовке биологических образцов для анализа их обрабатывают неравновесной плазмой с целью удаления органических веществ без изменения структуры неорганических составляющих [1].

Вопрос выбора пористого материала напрямую связан с пониманием его характеристики и требований области применения.

Пористые металлические материалы представляют собой тип металлического материала с очень пористой структурой. Для изготовления различных конструкций выбираются различные материалы – пористые тантал, титан, сплавы на его основе, ниобий, Co–Cr–Mo. Эффективная площадь поверхности этих материалов намного больше, чем их фактический объем. Пористые металлические материалы обладают хорошей реакционной активностью и адсорбционной способностью в каталитических реакциях и процессах адсорбции. Связанная структура пор пористых металлических материалов позволяет свободно переносить жидкости или газы в материале, что делает их идеальным выбором для фильтрации, разделения и передачи материалов [2].

Пористые металлические материалы широко используются в различных областях. В энергетике они используются в качестве носителей катализатора, материалов для электродов и материалов для хранения водорода. В области окружающей среды такие материалы применяют для очистки сточных вод и воздуха, разделения газов. В медицине они используются для получения искусственных костей, в тканевой инженерии и доставке лекарств. Наиболее перспективным металлическим пористым материалом медицинского назначения сегодня является никелид титана и сплавы на его основе. Пористый никелид титана обладает уникальной биохимической и биомеханической совместимостью с тканями организма и в связи с этим способен длительное время существовать в организме, сохраняя свои функциональные способности [3].

Широкое применение в различных областях находят пористые полимеры и композиционные материалы на их основе. Пористые полимеры позволяют использовать преимущества материалов с высокой удельной поверхностью. Они могут быть изготовлены множеством способов, легко осуществимых на практике, а разнообразие методов получения пористых полимеров позволяет регулировать их структуру и функциональность поверхности пор.

Одними из самых востребованных типов полимерных материалов, благодаря их уникальным свойствам, являются ПТФЭ (политетрафторэтилен) и СВМПЭ (сверхвысокомолекулярный полиэтилен). ПТФЭ – наиболее термохимически стойкий полимер. Диапазон рабочих температур изделий из пористого ПТФЭ – от 193 до +160 °С, ограниченно – до +250 °С. Данный материал обладает уникальной для известных полимеров химической инертностью, не разрушается и не выделяет никаких примесей при взаимодействии даже с высокоагрессивными веществами, имеет высокую степень гидрофобности. По химической стойкости СВМПЭ приближен к ПТФЭ, хотя рабочая температура материала лежит в диапазоне от –60 до 100 °С.

Пористая структура и свойства данных порошков открывают новые возможности для использования в различных областях. В микроэлектронике ПТФЭ используют в качестве сепараторов, фильтров и гермовыводов для защиты от загрязнений, СВМПЭ – как подложку для хрупких мембран. Из-за своей высокой термостойкости

и химической инертности ПТФЭ применяют для фильтрации высокоагрессивных жидких и газообразных сред, а СВМПЭ – в химических установках и в качестве защитных покрытий для оборудования [4].

В аккумуляторах и химических источниках тока ПТФЭ служит полупроницаемой перегородкой, защищая электроды от разрушения. В области высокочастотной техники, благодаря своим отличным диэлектрическим свойствам и низкому уровню поглощения энергии, ПТФЭ используют в антеннах и других высокочастотных устройствах. Для снижения шума и повышения эффективности работы оборудования в пневматических системах используют пористый СВМПЭ. В текстильной, автомобильной и мебельной промышленности поропласты из СВМПЭ могут применяться в качестве вакуумных прижимных листов для разделочных столов. Материалы на основе смеси СВМПЭ и цеолитов обладают различной степенью смачивания водой, связанной с твердой пористой структурой полученных пленок.

Поропласты из ПТФЭ и СВМПЭ широко применяют и в медицине. Из них изготавливают имплантаты, биопротезы, мембраны для оксигенаторов, материалы и фильтры для нужд биотехнологии. Такие материалы используют для аналитических целей, при диагностике *in vitro* и молекулярных диагностических процедурах. В медицине находят применение также пористый полиметилметакрилат, полиуретановая пена, силиконовая резина, гидрофильные гели, полиамидные сети, пористый полиэтилен высокой плотности, полисульфон и др. Эти пористые материалы используют в основном для заполнения пространств, замещения и реконструкции различных дефектов и деформаций [3].

С целью получения пористых каркасов для инженерии костной ткани в последнее десятилетие наиболее интенсивно развивается метод 3D-печати с использованием PLA (полилактид). Метод 3D-печати получения пористых материалов на основе PLA в сочетании со вспениванием в сверхкритическом CO₂ позволяет создавать каркасы, содержащие поры размером от 10 до 300–700 мкм. Такой комбинированный метод перспективен для создания матриц с иерархической структурой и их использования в тканевой инженерии [5].

Таким образом, пористые материалы с их уникальной структурой и свойствами представляют собой инновационное направление в материаловедении, открывающее новые горизонты для создания высоких технологий. Развитие этих технологий в будущем приведет к расширению применения пористых материалов и созданию новых продуктов, что, в свою очередь, позволит значительно повысить эффективность различных процессов. А современные подходы, объединяющие пористые и монолитные материалы, дадут возможность вырабатывать решения, которые будут учитывать особые свойства этих материалов и способствовать развитию технологий, соответствующих требованиям самых различных отраслей.

Л и т е р а т у р а

1. Кудрявцев, П. Г. Основные пути создания пористых композиционных материалов – URL: https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-5-2020/256-269.pdf (дата обращения: 21.03.2025).
2. Пористые металлические материалы – URL: <https://ru.qyxtitanium.com/porous-metal-materials/> (дата обращения: 21.03.2025).
3. Ходоренко, В. Н. Биосовместимые пористые проницаемые материалы / В. Н. Ходоренко, Ю. Ф. Ясенчук, В. Э. Гюнтер. – URL: <https://stati34521.narod.ru/NiTi/24.pdf> (дата обращения: 21.03.2025).
4. Астахов, Е. Ю. Характеристики пористых пленок политетрафторэтилена, полученных из суспензий порошков в спирте / Е. Ю. Астахов, Н. М. Больбит, Э. Р. Клишпонт // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2007. – Т. 49, № 2. – С. 296–302.

5. Пористые материалы на основе полилактида: получение, особенности гидролитической деструкции и области применения / Е. С. Трофимчук, В. В. Поцелеева, М. А. Хавпачева [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия С. – 2021. – Т. 63, № 2. – С. 190–211. – URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=vmssc&year=2021&vol=63&iss=2&file=VMSC2102010Trofimchuk.pdf> (дата обращения: 22.03.2025).

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 45

В. Н. Панфилов, Е. Г. Акунец

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

Научные руководители: И. В. Царенко, Е. М. Акулова

Исследовано влияние технологических параметров лазерной обработки на триботехнические характеристики стали 45. Проведена оценка влияния технологических режимов лазерной обработки (тока накачки I , длительности импульса τ) на значения энергии в импульсе E , передаваемой на обрабатываемую поверхность. Изменение силы тока в диапазоне 60–120 А и времени импульса от 5 до 25 мс позволило получать изменение энергии в импульсе в пределах от 0,3 до 4,1 Дж. Установлено, что триботехнические свойства поверхности, обработанной одинаковой энергией, но различными режимами воздействия отличаются. Износостойкость образца оценивали по ширине дорожки трения. Определено, что при токе накачки 60 А минимальный коэффициент трения и максимальная износостойкость получены при длительности импульса 20 мс.

Ключевые слова: триботехнические характеристики, углеродистая сталь, лазерная обработка, энергия в импульсе, длительность импульса, ток накачки, упрочнение, износостойкость, коэффициент трения.

Технология локального лазерного упрочнения быстроизнашивающихся участков поверхностей деталей дает возможность повысить износостойкость и срок службы деталей без применения дорогостоящих расходных материалов, без необходимости трудоемких и энергоемких подготовительных и последующих доводочных операций [1]. Повышение износостойкости поверхности после лазерной закалки достигается за счет структурно-фазовых изменений поверхностного слоя на глубину 0,3–1,0 мм без оплавления поверхности, без нарушения макро- и микрогеометрии поверхности детали. В случае оплавления поверхности глубина структурно-фазовых изменений может достигать 3,0 мм. Такая возможность обеспечивается за счет заданного распределения плотности мощности в пятне излучения многолучевого лазера. Благодаря возможности локального упрочнения только быстроизнашивающихся участков (а не всей детали), высокой линейной скорости обработки и автоматизации управления технологическим процессом, лазерное поверхностное термоупрочнение отличается коротким технологическим циклом, оперативностью выполнения работ, относительно низкой удельной энерго-трудо-материалоемкостью и соответственно низкой стоимостью. Однако, несмотря на многолетние исследования в области лазерного упрочнения поверхности, и на сегодня остается актуальной задача оптимизации режимов лазерной обработки, изучения особенностей воздействия лазерного импульса на структуру поверхности и ее свойства.

Цель данной работы – оценить влияние технологических параметров процесса лазерной обработки поверхности стали на ее триботехнические характеристики.

Исследуемые образцы – сталь 45. Лазерную обработку проводили на экспериментальной лазерной технологической установке (разработка ГГУ им. Ф. Скорины,

г. Гомель [2]) на базе твердотельного лазера TL-400. Лазерное излучение в излучателе генерировалось в кристаллах алюмо-иттриевого граната АИГ : Nd^{+3} . Длина волны излучения – 1,064 мкм.

Триботехнические испытания проводились с помощью микротрибометра MTU-2K7 (разработка ИММС НАН Беларуси, г. Гомель [3]) по схеме возвратно-поступательного движения сферы-контртела относительно плоскости исследуемого образца. Прибор обеспечивает измерение сил (коэффициента) трения пары «сфера/плоскость» в автоматическом режиме под управлением специального программного обеспечения.

Условия проведения триботехнических испытаний образцов до и после лазерной обработки приведены в таблице.

Параметры триботехнических испытаний

Задаваемый параметр	Значение
Нормальная нагрузка P , мН	500
Длина хода, мм	5,0
Линейная скорость V , мм/с	2,5
Путь скольжения S , м	3,0
Количество циклов n	300,0

При проведении триботехнических испытаний оценивался коэффициент трения f и износостойкость образца по ширине дорожки трения H . Ширину дорожки трения H определяли прямым измерением на растровом электронном микроскопе. Для определения микротвердости использовали микротвердомер ПМТ-3М, который позволяет проводить измерение твердости по методу Виккерса. Измеренные результаты были конвертированы в шкалу Роквелла с использованием корреляции по стандарту ASTM E-140.

На первом этапе исследований была проведена оценка влияния параметров технологических режимов лазерной обработки (тока накачки I , длительности импульса τ) на значения энергии в импульсе E , передаваемой на обрабатываемую поверхность. Изменение силы тока в диапазоне 60–120 А и времени импульса от 5 до 25 мс позволило получать изменение энергии в импульсе в пределах от 0,3 до 4,1 Дж. Согласно полученным результатам, одну и ту же энергию можно передать поверхности с помощью различных комбинаций значений I/τ . Так, например, энергетический импульс в 0,8 Дж поверхность может получить при ее обработке либо током 60 А в течение 15 мс, либо током 120 А – в течение 5 мс.

Сравнение характеристик поверхностей, обработанных одинаковой энергией, но разными режимами I/τ дало возможность сделать вывод о неоднозначности влияния энергии в импульсе на характеристики получаемой после обработки поверхности. Так, например, поверхности образцов 3 и 6 (нумерация образцов по табл. 2) получены при обработке поверхности энергией 0,8 Дж, но токами 60 и 120 А – в течение 15 и 5 мс соответственно. Поверхность, полученная после обработки в режиме 60А/15 мс, характеризуется более высокой микротвердостью, более низкими значениями коэффициентов трения f . Таким образом, можно сделать вывод, что ключевым фактором образования износостойкой структуры на поверхности является время импульса: 5 мс обработки недостаточно для образования износостойкой структуры. Этот же вывод подтверждает

сравнение характеристик образцов 4 и 7 (табл. 2). Несмотря на более низкую энергию обработки образца 4 (1 Дж) по сравнению с энергией обработки образца 7 (1,4 Дж), коэффициент трения f для образца 4 меньше, значение ширины дорожки трения H – ниже. Объяснить такую разницу можно все тем же более длительным временем обработки (20 мс против 10 мс).

Согласно результатам проведенных исследований, наилучшими триботехническими характеристиками: низким коэффициентом трения, высокой твердостью, низкой износостойкостью – обладают образцы, полученные после лазерной обработки током накачки 60 А в течение 20 мс.

Таблица 2

Влияние параметров лазерной обработки на триботехнические характеристики образцов

Номер	Параметры лазерной обработки			f	HRC	H , мкм
	I , А	τ , мс	E , Дж			
0	0	0	0	0,75	35	511
1	60	5	0,3	0,75	45	493
2	60	10	0,5	0,73	57	487
3	60	15	0,8	0,64	66	458
4	60	20	1,0	0,20	75	390
5	60	25	1,2	0,30	67	451
6	120	5	0,8	0,75	53	472
7	120	10	1,4	0,72	63	462

Структурные изменения, происходящие при лазерной закалке стали 45, достаточно хорошо изучены [4]. Как правило, ее исходная равновесная структура состоит из примерно одинакового количества феррита и перлита. В момент импульса лазерного излучения происходит полная фазовая перекристаллизация с образованием аустенита. Но степень его гомогенизации зависит от времени теплового воздействия. Наиболее вероятно, что с увеличением времени обработки создаются более благоприятные условия для завершения фазовой перекристаллизации.

Л и т е р а т у р а

1. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Баумана, 2006.
2. Лазерная установка с оптоволоконной приставкой и процессы сварки изделий из нержавеющей стали / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, С. Н. Юркевич // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2003. – № 4 (8). – С. 84–87.
3. Возвратно-поступательный миллитрибومتر МТУ-2К7 / А. Я. Григорьев, Д. М. Гуцев, А. П. Зозуля [и др.] // Трение и износ. – 2014. – № 6 (35). – С. 664–669.
4. Коваленко, В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, В. С. Черненко. – Киев : Техника, 1990.

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Г. К. Корнеевец, Д. А. Вайнер, Ф. А. Карчевский

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

Научные руководители: Ю. М. Кривогуз, И. В. Царенко

Исследованы механические характеристики полимерных композиционных материалов на основе полипропилена (ПП), содержащие стекловолокно. Установлено, что введение добавки 10 мас. % функционализированного полипропилена (ФПП) в стеклонаполненный ПП способствует росту комплекса показателей его механических свойств. Отмечено, что достигаемый эффект повышения прочности при растяжении до 1,74 раза по сравнению с исходным ПП зависит от типа добавки ФПП и более явно выражен для высокоиндексных модификаций ФПП.

Ключевые слова: стекловолокно, полимерные композитные материалы, полимеры, механические свойства, полипропилен, стеклопластик.

По мнению экспертов [1, 2] в обозримом будущем доминирующая роль будет принадлежать волокнонаполненным (и, прежде всего, стеклонаполненным) термопластам, огнестойким пластикам и материалам на базе смесей разнородных полимеров.

Полимерные стекловолокниты отличаются от других композиционных материалов конструкционного назначения сочетанием высокой прочности, сравнительно низкой плотности, теплопроводности, хороших электроизоляционных свойств, доступности и низкой стоимости упрочняющего наполнителя.

При создании волокнонаполненных полимерных композиционных материалов (ПКМ) следует учитывать, что сильное влияние на уровень показателей свойств оказывают геометрические параметры стекловолокна (СВ) (отношение длины к диаметру), степень воздействия тепловых и силовых факторов на полимерный расплав при компаундировании и переработке ПКМ, состав полимерной матрицы, степень термических макромолекулярных превращений при компаундировании и переработке и др.

При получении стеклоармированных ПКМ наиболее пристальное внимание уделяется вопросам, связанным с физико-химическими явлениями на границе раздела поверхности волокна с многокомпонентными полимерными матрицами (на базе смесей разнородных полимеров), а также композитам, в которых СВ сочетаются с другими типами наполнителей.

Цель данной работы – исследовать свойства ПКМ на основе стеклонаполненного полипропилена (ПП), оценить перспективность его применения для изготовления деталей машиностроения.

Для получения стеклонаполненного ПКМ использовали СВ марки ЕС13-2400Т-54С с диаметром моноволокон 13 мкм, ПП марки Бален 01030 (производства ОАО «Уфаоргсинтез», ТУ 2211-074-05766563-2005), в качестве модифицирующей добавки использовали функционализированный полипропилен (ФПП), который соответствовал требованиям ТУ РБ 400084698.072-2003 и был получен по технологии реакционной экструзии, разработанной в ИММС НАН Беларуси.

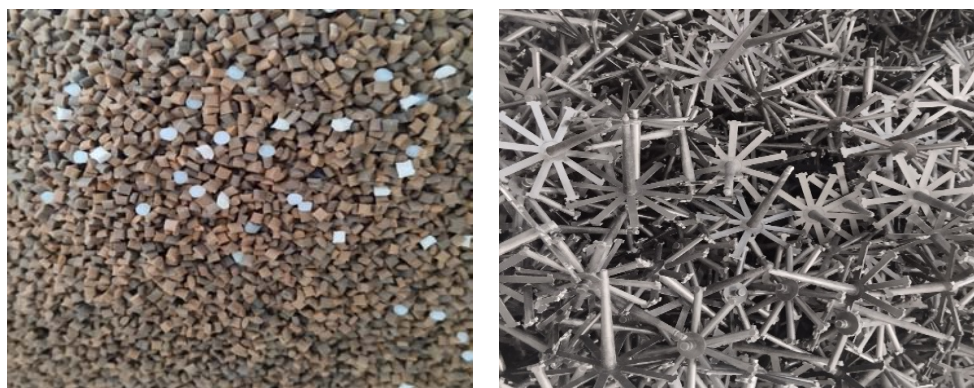
Композиты полипропилена (ПП) с СВ и с функциональным полипропиленом получали на экструдере «ТSSK-35/40» (рис. 1) при температуре 240 °С. В процессе производства использовали спиральный загрузчик для подачи материалов в экструзи-

дер, с помощью которого материалы равномерно выдавливаются, расплавляются и пластифицируются в экструдере в полосы материала, выходящие из головки машины. После дегазации и фильтрации (гидравлической смены сита) полосы материала охлаждались в резервуаре для воды, сушились в сушилке с мощным воздушным потоком и нарезались на гранулы (рис. 2, *а*).

Ударную вязкость по Шарпи стеклонаполненных композитов на базе ПП (рис. 2, *б*) определяли на образцах в виде брусков размером $80 \times 10 \times 4$ мм с без надреза (ГОСТ 4647). Использовали маятниковый копер «PIT 550J» (фирма «Shenzhen Wance Testing Machine Co. Ltd.», КНР).



Рис. 1. Экструдер «TSSK-35/40»



а)

б)

Рис. 2. Продукты с содержанием стеклопластика:
а – гранулы стеклонаполненного полиамида; *б* – отлитые бруски
из смеси стекловолокна и полиамида

В результате испытания было установлено, что введение добавки 10 мас.% ФПП в стеклонаполненный ПП способствует росту комплекса показателей его механических свойств. Достижимый эффект повышения прочности при растяжении (σ_p) до 1,74 раза по сравнению с исходным ПП зависит от типа добавки ФПП и более явно выражен для высокоиндексных модификаций ФПП (см. таблицу).

При использовании высокоиндексных модификаций ФПП почти в 2,5 раза возрастают значения модуля упругости при растяжении (E_p) ПП/СВ композитов. Введение 10 мас. % ФПП в стеклонаполненный ПП позволяет увеличить ударную вязкость

в 1,80–2,68 раза по сравнению с исходным ПП. В результате могут быть получены композиционные материалы со сбалансированным сочетанием эксплуатационных свойств: высокими прочностью, жесткостью и стойкостью к ударным воздействиям.

Следует отметить, что значения вязкости стеклоармированных ПП композитов отличаются незначительно и имеют относительно низкую величину. Вероятной причиной потери текучести стеклоармированными ПП композитами может быть адсорбционное взаимодействие макромолекул ПП с поверхностью СВ, что способствует росту вязкости расплава.

**Показатели механических свойств композитов на основе ПП 01030,
наполненного 30 мас. % СВ**

Материал	σ_p , МПа	ϵ_p , %	E_p , ГПа	a_p , кДж/м ²	ПТР, г/10 мин ($D_k = 1,18$ мм)
ПП 01030/СВ – 30 %	$35,0 \pm 0,3$	4,5	3,1	5,0	1,9
ПП 01030/ФПП – 10 %/СВ – 30 %	$61,0 \pm 0,4$	2,2	7,7	12,8	1,3

Работы в области ПКМ, содержащих в качестве наполнителя стекло- и углеволокна, весьма актуальны для Беларуси, поскольку данные волокна в промышленном масштабе производятся в ОАО «ПолоцкСтекловолокно» и «СветлогорскХимволокно».

ОАО «Полоцк-Стекловолокно» специализируется на выпуске стекловолокна типов «Е», «S-2», «С», являющегося важнейшим наполнителем для ПКМ, и изделий на его основе: стеклонитей, стеклоровингов, стеклотканей, стеклосеток, стеклохолстов. Производственные мощности рассчитаны на выпуск 35 тыс. т в год непрерывного стекловолокна и изделий из него, в том числе стеклоровинга и рубленого стекловолокна, используемых в качестве наполнителей для полимерных композитов.

Рынок стеклопластиковых изделий переживает значительный рост, и ожидается, что это направление будет развиваться и в будущем. Рост спроса на стеклопластик в различных отраслях, развитие новых областей применения и экологические аспекты использования этого материала – все эти факторы повлияют на развитие рынка в ближайшие годы. Ожидается, что стеклопластик будет играть важную роль в создании более экологически чистой и эффективной экономики, и его применение будет расти в различных секторах экономики. Компании, которые способны предложить инновационные решения на основе стеклопластика, будут иметь конкурентное преимущество на этом растущем рынке.

Л и т е р а т у р а

1. Песецкий, С. С. Полимерные композиты многофункционального назначения: перспективы разработок и применения в Беларуси (обзор) / С. С. Песецкий, Н. К. Мышкин // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 6–29. – DOI 10.32864/polymmattech-2016-2-4-6-29
2. Кривогуз, Ю. М. Влияние функционализированных полиолефинов на структуру и свойства смесевых материалов на основе алифатических полиамидов / Ю. М. Кривогуз, О. А. Макаренко, С. С. Песецкий // Реактив-2018 : тез. докл. XXXI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2–4 окт. 2018 г. / Ин-т химии новых материалов НАН Беларуси ; редкол.: В. Е. Агабеков [и др.]. – Минск, 2018. – С. 61.
3. Горячкина, К. В. Полипропилен, как современный полимерный материал / К. В. Горячкина // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – № 33. – С. 169–172. – EDN XBJXMV.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУНКЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛИОФИНОВ НА ФАЗОВУЮ СТРУКТУРУ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ПОЛИМЕРОВ

М. В. Шкуратов, В. Д. Мельников, Р. О. Кирьянов

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

Научные руководители: М. Ю. Кривогуз, И. В. Царенко

Изучена перспективность применения в машиностроении смесевых полимерных композитов на базе конструкционных термопластов, выпускаемых в Республике Беларусь. Исследована эффективность функционализированных полиофинов (ФПО) в качестве компатибилизаторов смесевых полимерных композиционных материалов и оценено с помощью методики растровой электронной микроскопии их влияние на морфологию и фазовую структуру композиционных материалов на основе смесей полиамида 6 (ПА6) с полиолефинами (ПО). Установлено, что привитые адгезионно-активные группы ФПО способствуют интенсификации межфазного взаимодействия полиолефиновой фазы с матричным ПА6, уменьшению размеров частиц дисперсной фазы, увеличению ее удельной площади и формированию прочных связей между полимерными компонентами.

Ключевые слова: полимеры, компатибилизаторы, композиционные материалы, функционализированные полиофины (ФПО), полипропилен, полиамид.

Республика Беларусь (РБ) является одним из крупнейших в Европе производителей таких полимеров как полиамиды, полиалкилентерефталаты и полиолефины [1]. В последние годы для РБ стала важной задача расширения ассортимента выпускаемых полимерных материалов. Это возможно за счет разработки широкой гаммы смесевых композиций на основе полимерного сырья, выпускаемого в республике. Однако вследствие низкой энтропии смешения длинноцепных молекул большинство полимеров термодинамически несовместимы и при их смешении происходит фазовое разделение, приводящее к ухудшению показателей свойств смесевых материалов. Поэтому важнейшей задачей при создании технически ценных полимерных смесевых композиционных материалов является подбор компатибилизаторов - добавок, направленно влияющих на совместимость компонентов и свойства смесевых композиций.

В настоящее время многие научные центры мира и исследовательские лаборатории крупнейших промышленных фирм заняты разработкой компатибилизаторов для смесевых полимерных композиционных материалов. При этом особое внимание уделяется компатибилизаторам на основе функционализированных полиолефинов (ФПО) – полимеров и сополимеров олефинов и олефиновых эластомеров, в состав макромолекул которых тем или иным путем введены полярные функциональные группы. Такое пристальное внимание к ФПО объясняется их способностью снижать поверхностную энергию между фазами и повышать межфазную адгезию за счет реализации специфических межмолекулярных взаимодействий между разноименными компонентами смеси. Однако к настоящему времени накопленных экспериментальных данных явно недостаточно для организации промышленного производства компатибилизаторов на основе ФПО в РБ. Кроме того, информация, касающаяся рецептурных составов и технологических параметров получения компатибилизированных полимерных смесевых композиций, является «ноу хау» фирм разработчиков. В этой связи очевидна необходимость проведения систематических исследований, направленных на разработку компатибилизаторов на основе ФПО и создание с их использованием машиностроительных материалов на базе конструкционных термопластов, выпускаемых в РБ.

Функционализированные полиолефины рассматриваются как полимеры, в состав молекулярной цепи которых введены реакционноспособные группы функциональные группы. Введение функциональных групп в состав макромолекулярных цепей полиолефинов (ПО) сопровождается улучшением их адгезии к различным материалам, восприимчивости к красителям, проницаемости, совместимости с вводимыми добавками и т. д. Содержащие функциональные группы ПО могут служить исходными продуктами для создания материалов со специальными свойствами. Например, полиолефины, содержащие в своем составе карбоксильные группы, применяются для синтеза иономеров, ПО с привитыми силановыми соединениями используют для получения структурированных материалов и т. д. Известно применение ФПО в качестве высокомолекулярных компатибилизаторов при получении смесевых полимерных материалов.

Цель данной работы – исследовать эффективность функционализированных полиолефинов в качестве компатибилизаторов смесевых полимерных композиционных материалов и оценить их влияние на морфологию и фазовую структуру смесей на основе полиамида 6 (ПА6) с помощью методики растровой электронной микроскопии.

Для получения полиамидных смесей гранулированные компоненты – ПА6, исходные ПО или ФПО смешивали между собой в двухлопастном смесителе. Гранулы ПА6 предварительно высушивали до остаточной влажности не более 0,1 %. Далее полученную механическую смесь, включающую ПО или ФПО, подвергали соэкструзии в расплаве. Температура в основных зонах смешения материального цилиндра двухшнекового экструдера TSSK-35/40 для смесей на основе ПА6 составляла 245–250 °С.

Морфологию и фазовую структуру смесевых материалов анализировали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на сколах охлажденных в жидком азоте образцов. Время выдержки образцов в жидком азоте составляло 30 мин. Исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH с системой дисперсионного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD, «Tescan/OXFORD Instruments Analytical» (Чехия/Англия).

В результате исследования морфологии и фазовой структуры полиамидных смесей методом РЭМ было показано, что совмещение ПА6 с исходным полиэтиленом высокой плотности (ПЭВП) и полипропиленом (ПП) приводит к образованию выраженной двухфазной системы (рис. 1, а).

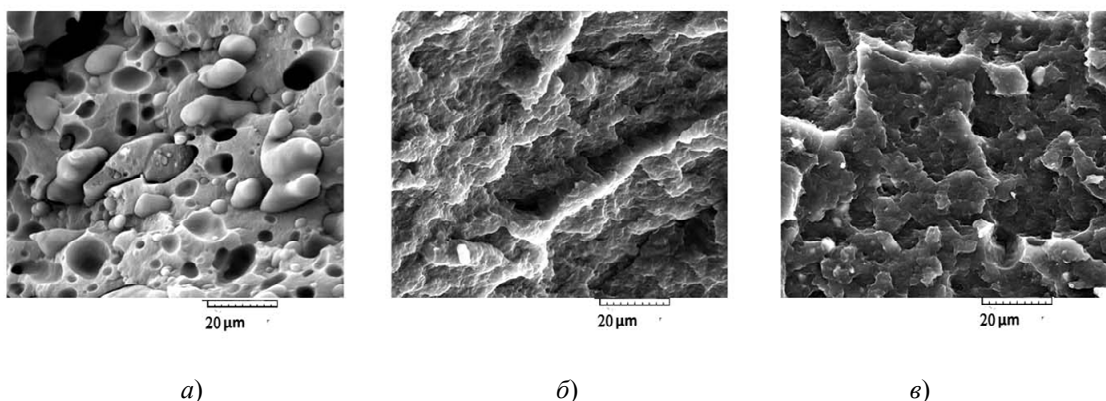


Рис. 1. Микрофотографии поверхностей сколов образцов из полиамидных смесей:
а – ПА6/ПЭВП – 30 %; б – ПА6/ФПЭВП – 30 %; в – ПА6/ФПП – 30 %

В данных композитах фаза ПО слабо связана с матричным ПА6, имеет четко выраженную границу раздела и агрегирована в относительно крупные, отличающиеся по размеру, сферические образования (5–8 мкм), что свидетельствует о несовместимости полимерных компонентов (рис. 1, *а*). Существенные изменения в морфологии смесевых систем происходят при смешении ПА6 с ФПЭВП (рис. 1, *б*) и ФПП (рис. 1, *в*). В этих смесевых композитах за счет интенсификации межфазного взаимодействия отдельные частицы ФПО становятся трудноразличимыми, а фазовая структура приобретает квазиоднородный характер. Подобные изменения фазовой структуры характерны для аналогичных смесей ПА6 с другими типами ФПО. Уменьшение размера частиц дисперсной фазы, образованной ФПО, приводит к увеличению ее удельной площади и формированию прочных связей между полимерными компонентами. В результате этого обеспечивается гомогенность смесевых композиций (смеси с ПА6), благодаря чему удается в полной мере реализовать модифицирующую способность ФПО, содержащих в своей структуре привитые адгезионно-активные группы.

В результате проведенных исследований были разработаны составы, на основе которых получены ряд изделий используемых в машиностроении (рис. 2).



Рис. 2. Изделия из композиционных материалов на основе смесей ПА6 и функционализированного ПО

Таким образом, в результате исследования морфологии и фазовой структуры смесей ПА6 с нефункционализированными и функционализированными полиолефинами установлено, что функционализация ПО приводит к интенсификации межфазного взаимодействия и к образованию квазиоднородной фазовой структуры. Привитые адгезионно-активные группы ФПО способствуют уменьшению размеров частиц дисперсной фазы, увеличению ее удельной площади и формированию прочных связей между полимерными компонентами.

Литература

1. Песецкий, С. С. Полимерные композиты многофункционального назначения: перспективы разработок и применения в Беларуси (обзор) / С. С. Песецкий, Н. К. Мышкин // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 6–29. – DOI 10.32864/polymmattech-2016-2-4-6-29

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ БУНТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ ШХ15 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПЕРЛИТА

С. А. Савченко

Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», г. Жлобин

Н. Н. Мельников

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Приведены результаты исследований по совершенствованию режима поточной термообработки бунтового горячекатаного проката для получения микроструктуры сорбитообразного перлита. Установлено, что при эффективном поточном двухстадийном охлаждении бунтового проката из непрерывнолитых заготовок диффузионный термокинетический распад переохлажденного аустенита происходит с получением мелкодисперсной перлитной структуры. Отмечено, что последующий сфероидизирующий отжиг такого проката приводит к полной глобулизации пластин цементита Fe_3C .

Ключевые слова: поточная термообработка, горячая прокатка, подшипниковая сталь, дисперсность перлита, двухстадийное охлаждение, динамическая рекристаллизация, термокинетический распад аустенита.

Цель работы – разработка методики расчета водяного охлаждения режима поточной двухстадийной термообработки бунтового проката из подшипниковой стали ШХ-15 для получения мелкодисперсной сорбитообразной структуры перлита.

Объектом исследования в работе является технологический процесс прокатки шарикоподшипниковых (ШХ) бунтовых сталей.

В течение более раннего этапа проводимых работ было установлено, что наилучшей исходной структурой под сфероидизирующий отжиг при прокатке катанки из ШХ-сталей на проволочных станах является сорбит. Сфероидизация грубопластинчатого перлита не позволяет получить полную глобулизацию пластин цементита, поскольку Cr и Mn, распределяясь в цементите, замедляют процесс сфероидизации из-за большого межпластинчатого расстояния [1]. Структура троостита прекрасно подходит для сфероидизации, но при этом твердость после термообработки повышается выше требований ГОСТ 801.

Для получения равномерной микроструктуры и стабильного ОБС после анализа термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита стали ШХ-15 [2] был разработан усовершенствованный режим поточной термообработки: начальное поэтапное охлаждение водой до температуры 870 ± 20 °C в зоне виткообразователя и последующие охлаждение воздухом на роликовом конвейере четырьмя первыми вентиляторами с требуемой мощностью подачи. Начальная температура охлаждения в зоне виткообразователя была принята равной 870 ± 20 °C (точка A_{r3}) как наиболее оптимальная для формирования мелкодисперсной структуры без образования заметной карбидной сетки при разных скоростях охлаждения [3]. Температура переохлажденного аустенита в период распада – 630 ± 20 °C во временном интервале движения по роликовому конвейеру воздушного охлаждения 15–80 с. При этом интенсивность охлаждения во время переохлаждения составила $\Delta T / \Delta \tau = 18\text{--}20$ °C/с.

Снижение температуры раската в камерах принудительного водяного охлаждения определили исходя из уравнения теплового баланса, согласно которому количество тепла, отдаваемое металлом, равно количеству тепла, поглощаемого водой [4]. При охлаждении раската с начальной температуры t_n до конечной температуры t_k секундное количество тепла, отдаваемого металлом, составляет:

$$Q_1 = \omega v \rho C_c (t_n - t_k), \quad (1)$$

где ω – площадь сечения катанки; v – скорость движения раската; $\rho = 7550 \text{ кг/м}^3$ – плотность при начальной температуре полосы $t_n = 1000 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ и конечной температуре на виткообразователе $t_k = 870 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$; C_c – теплоемкость стали, Дж/(кг · °C).

Теплоемкость стали ШХ-15 в указанном диапазоне температур по результатам собственных исследований и данным, приводимым в работе [5], практически не изменяется и может быть принята $C_c = 636 \text{ Дж/(кг · }^\circ\text{C)}$.

Секундное количество тепла, поглощаемого водой при нагреве ее от начальной температуры $t_{вн}$ до конечной $t_{вк}$, рассчитывается по формуле

$$Q_2 = C_b m (t_{вк} - t_{вн}), \quad (2)$$

где $C_b = 4170$ – теплоемкость воды при $t_b = 30 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$; m – масса воды кг/с.

Приравнявая выражения (1) и (2) и проводя несложные преобразования, получили следующую формулу для расчета снижения температуры раската в камерах принудительного охлаждения:

$$t_n - t_k = \frac{C_b W k (t_{вк} - t_{вн})}{3,6 \omega v \rho C_c}, \quad (3)$$

где W – расход охлаждающей воды в камерах по показаниям расходомеров, $\text{м}^3/\text{ч}$; k – коэффициент эффективности работы камеры, связанный с потерями воды на отсечку и утечку. Экспериментально установлено, что $k = 0,75\text{--}0,80$ [6].

Для прокатки сортамента катанки с диаметрами d , мм, со скоростью v , м/с, получим следующий расход воды W , $\text{м}^3/\text{ч}$:

$d =$	$v =$	$W =$
(5,5)	(115)	(237,7)
6,0	110	270,6
6,2	108	283,7
6,3	107	290,1
7,0	105	351,5
8,0	100	437,3
8,5	95	469
9,5	85	524,1
11,5	62,5	564,7
13,5	52,8	563,7
16,5	30,3	563,6
(18,5)	(24,08)	(563,1)

Формула (3) позволяет путем изменения расхода воды W управлять снижением температуры раската $\Delta t_p = t_n - t_k$ и определять температуру полосы при выходе из камеры $t_k = t_n - \Delta t_p$, или при заданном снижении температуры Δt_p определять необходимый расход воды W . Диапазон изменения температуры воды в камерах охлаждения составляет $\Delta t_b = 30 \pm 5$ °С, что обусловлено спецификой охлаждения в градирне стана. Для получения требуемой температуры полосы на входе в рольганг воздушного охлаждения $t_k = 870 \pm 20$ °С необходимо определить расход воды W в камерах водяного охлаждения. Преобразуя формулу (4), получим зависимость для определения требуемого расхода воды:

$$W = \frac{3,6(t_n - t_k) \omega \rho C_c}{(t_{bk} - t_{bh}) C_k k}. \quad (4)$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующий вывод: до сечения $d = 9,5$ мм расход воды увеличивается линейно, а для сечений $d = 11,5$ – $18,5$ остается неизменным: $W = 563$ м³/ч. Построив в программном пакете EXCEL график зависимости расхода воды от диаметра сечения проката (рис. 1), можно обработать данные инструментами математической статистики и получить регрессионную зависимость (4), с высокой достоверностью ($R^2 = 0,994$).

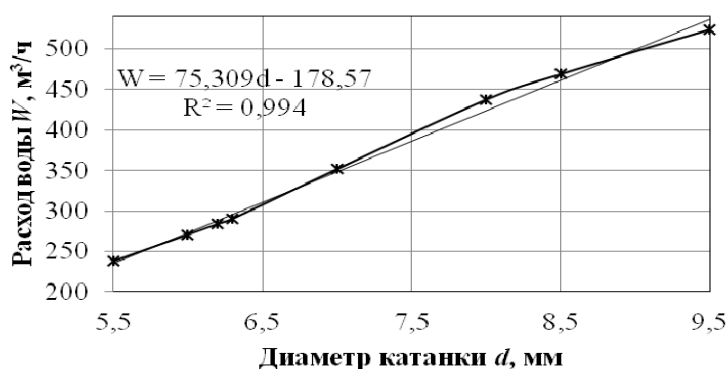


Рис. 1. Графики зависимости расхода воды от диаметра сечения проката

Таким образом, полученная упрощенная формула позволяет оператору поста поточной термообработки назначать требуемый расход воды при прокатке подшипниковой стали ШХ-15 с температурой на виткообразователе $t_k = 870 \pm 20$ °С:

$$W = 75,309d - 178,57. \quad (5)$$

Литература

1. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец, С. А. Савченко, В. И. Возная [и др.] // Черная металлургия. – 2021. – Т. 77, № 7. – С. 804–810. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810
2. Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко, А. Б. Сычков // Черные металлы. – 2024. – № 4. – С. 65–73. – DOI 10.17580/chm.2024.04.05

3. Путеев, В. С. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев, С. А. Савченко, И. А. Панковец [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. – DOI 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73
4. Савченко, С. А. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возня, И. В. Астапенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 52–61. – EDN JVZFKY.
5. Астапенко, И. В. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // 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, 2020. – С. 100–102.
6. Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. А. Гузова, А. Б. Сычков // Черная металлургия. – 2023. – Т. 79, № 3. – С. 251–260. – DOI 10.32339/0135-5910-2023-3-251-260

Секция III ЭНЕРГЕТИКА

ГАЗОПОРШНЕВЫЕ УСТАНОВКИ: ОТ УСТРОЙСТВА ДО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ

А. С. Фролов, И. А. Хилько

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

Научный руководитель Н. В. Широглазова

Отмечено, что в наше время очень актуальна тема экономного расходования энергии. С ростом тарифов и изменением нужд потребителей выясняется, что централизованное энергоснабжение постепенно теряет актуальность. На смену ему приходят более практичные и экономичные автономные источники производства тепла и электричества. Указано, что самый удачный вариант такого источника на сегодняшний день – газопоршневая установка.

Описано, что основу газопоршневой установки составляет приводной двигатель внутреннего сгорания, работающий на природном газе (природный газ, факельный газ, газ сточных вод, биогаз, газ мусорных свалок, коксовый газ, попутный газ) или жидком топливе (дизельное топливо, пропан, мазут). На одной раме с ним установлен синхронный электрический генератор.

Ключевые слова: двигатель, газопоршневая установка, когенерация, тригенерация, топливо, газопоршневая электростанция.

Различают несколько видов двигателей газопоршневых установок (ГПУ):

- *Двигатель, работающий только на газозоудушной смеси с искровым зажиганием.* В этих двигателях газ смешивается с воздухом до подачи во впускные клапаны. Во время цикла всасывания газ поступает также в небольшую форкамеру, затем смесь в форкамере воспламеняется с помощью свечи. Пламя из сопла форкамеры воспламеняет газозоудушную смесь во всем цилиндре, в результате чего происходит ее быстрое сгорание. После рабочей фазы дымовые газы удаляются из цилиндра и цикл повторяется.

- *Двухтопливные двигатели.* Двигатель, который может работать как на газозоудушном, так и на дизельном топливе, т. е. в двух режимах – газотопливном и жидкотопливном. Причем переключаться с дизельного на газотопливный не прекращая работы. Принцип работы в газотопливном режиме такой же как в двигателе типа SG, в жидкотопливном же все работает по дизельному циклу.

К основным системам ГПУ относятся:

- Газопоршневая установка – это не только *двигатель и генератор*, собранные на одной раме, но и большое количество вспомогательного оборудования. Мотор без вспомогательных агрегатов, как и любой двигатель у машины, состоит из таких элементов, как масляной поддон, маховик, поршни, коленвал, шатуны, клапана.

- *Смесеобразование:* всасывание воздуха идет через фильтры воздухоочистители, установленные на моторе. Подача топлива осуществляется с помощью регулирующего клапана-дозатора.

Кроме того, есть системы смазки, зажигания, надува, аккумулятор.

- *Газовая рампа*: газовое топливо подается к двигателю с помощью газовой рампы.

- *Блок системы охлаждения двигателя*: система охлаждения двигателя предназначена для полезного использования тепловой энергии охлаждения воды рубашки двигателя, охлаждения масла и топливной смеси.

- *Радиатор аварийного охлаждения*.

- *Блок системы утилизации тепла*: водогрейный котел-утилизатор дымовых газов кожухо-трубного типа устанавливается по ходу выхлопных газов после глушителя выхлопных газов. Предназначен для полезного использования тепла выхлопных газов и нагрева горячей воды до требуемой температуры.

- *Система маслохозяйства*: данная система предназначена для хранения расходного объема чистого масла, автоматического пополнения картеров двигателей, проведения замены масла в картерах.

- *Система управления двигателем*: установка комплектуется системой управления. Она обеспечивает подачу питания, управление и сбор информации от оборудования двигателя, генератора и всего вспомогательного оборудования.

Различают следующие режимы работы ГПУ:

- *Режим когенерации*: при работе газопоршневой установки в режиме когенерации выработка электрической энергии является приоритетной задачей работы установки. Выработка (утилизация) тепловой энергии пропорциональна степени загрузки машины (количеству вырабатываемой электроэнергии). При превышении тепловой мощности, вырабатываемой электростанцией над мощностью потребления, неиспользованная или лишняя часть попутного тепла газопоршневых установок сбрасывается в атмосферу. При обратной ситуации, при дефиците тепла, утилизируемого с газопоршневой установки, когда требуемая электрическая нагрузка меньше тепловой, проблему нехватки тепла решают путем установки дополнительных водогрейных или паровых котлов параллельно с системой утилизации тепла установки когенерации.

- Из режима когенерации можно с помощью специально установленного оборудования организовать *режим тригенерации* – одновременной выработки трех энергоресурсов – электроэнергии, тепла и холода.

Для целей тригенерации используются абсорбционные бромисто-литиевые холодильные установки (АБХМ) – предназначенные для отбора и удаления избыточного тепла от тепловых агрегатов и поддержания заданного оптимального температурного и теплового режимов.

Применение ГПУ. Основное применение ГПУ – это привод в газопоршневых электростанциях (ГПЭС).

ГПЭС представляет собой комплектный, компактный, автономный и эффективный генерирующий объект по выработке электрической и тепловой энергии:

- на промышленных предприятиях: для обеспечения собственных нужд в электроэнергии и тепле;

- на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) и котельных: для повышения эффективности производства энергии и снижения выбросов;

- на централизованных системах теплоснабжения (ЦСТ): для снабжения теплом жилых районов и общественных зданий;

- в нефтегазовой отрасли: для утилизации попутного нефтяного газа и обеспечения энергией удаленных объектов;

- на производство электроэнергии для собственных нужд;

– на крупных предприятиях: ГПУ могут использоваться в качестве основных или резервных источников электроэнергии;

– в больницах и других критически важных объектах: гарантированное электроснабжение в случае отключения централизованной сети;

– на пиковых электростанциях: ГПУ могут быстро запускаться и останавливаться, что делает их подходящими для покрытия пиковых нагрузок в энергосистеме.

Сельское хозяйство:

– обеспечение сельскохозяйственных предприятий электроэнергией и теплом.

Преимуществами ГПУ являются:

– *высокая эффективность*: комбинированное производство электроэнергии и тепла (когенерация) позволяет достичь общей эффективности до 90 %;

– *экономичность*: использование относительно дешевого газа и утилизация тепла снижают эксплуатационные затраты;

– *надежность и долговечность*: современные ГПУ отличаются высокой надежностью и длительным сроком службы при правильной эксплуатации и техническом обслуживании;

– *экологичность*: выбросы вредных веществ от ГПУ меньше, чем от традиционных электростанций, особенно при использовании биогаза;

– *автономность*: ГПУ могут работать автономно или параллельно с централизованной энергосистемой, обеспечивая надежное электроснабжение.

К недостаткам ГПУ относятся:

– *высокие начальные инвестиции*: стоимость приобретения и установки ГПУ выше, чем у традиционных генераторов;

– *необходимость обслуживания*: ГПУ требуют регулярного технического обслуживания и замены расходных материалов (масла, фильтров, свечей зажигания);

– *шум*: работа газового двигателя сопровождается шумом, поэтому требуется установка шумоглушителей;

– *выбросы*: хотя выбросы ГПУ меньше, чем у традиционных электростанций, они все же присутствуют (оксиды азота, углекислый газ).

Отметим следующее относительно применения газопоршневых установок в Беларуси. В настоящее время предприятием ООО «Микробелтех» поставлено и эксплуатируется в Республике Беларусь восемнадцать газопоршневых электростанций (ГПЭС) с системой утилизации тепла (СУТ) единичной мощностью 2,25 МВт. Ведется проектирование и строительство еще семи ГПЭС с СУТ суммарной мощностью 16,0 МВт. В г. Молодечно установлены шесть когенерационных модулей на базе газопоршневого двигателя внутреннего сгорания. Также в городе Речица находится нефтегазовая газопоршневая установка мощностью 3 МВт.

Таким образом, ГПЭС с применением ГПУ решают проблемы перехода к современной, устойчивой и экономически оправданной энергосистеме. Главные преимущества этих станций – очень высокая энергоэффективность, исключительная эксплуатационная гибкость, а также возможность работы на нескольких видах топлива. Область их применения чрезвычайно широка – от стационарных и плавучих электростанций базовой нагрузки до предоставления услуг по обеспечению динамической устойчивости сети и пиковой нагрузки, компенсации значительных колебаний ветровой и солнечной энергии, а также самых разнообразных промышленных применений для автономного производства электроэнергии практически в любых климатических условиях.

Литературы

1. Каталог / Офиц. сайт 9-й Междунар. выставки «Нефть и газ» MIOGE/2017, Москва, 26–29 июля 2007 г. – URL: <http://www.mioge.ru>.
2. Турбины и дизели : каталог энергет. оборудования. – URL: <http://www.turbine-diesel.ru/> (дата обращения: 17.04.2021).

ОХРАНА, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ БЕЛАРУСИ

Е. Ю. Петров

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

Научный руководитель Е. М. Ходько

Дан анализ состояния и развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Республики Беларусь. Показаны проблемы ООПТ и возможные направления их решения. Сделан вывод об эффективности политики государства в области функционирования и охраны ООПТ.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, устойчивое развитие, экотуризм, оптимизация.

Одной из сложных проблем современности является проблема сохранения биологического и ландшафтного разнообразия. Одна из причин утери разнообразия – хозяйственная деятельность человека. В сохранении биологического и ландшафтного разнообразия, формировании благоприятной окружающей среды главная роль принадлежит особо охраняемым природным территориям (ООПТ). Они являются национальным достоянием белорусского народа, поэтому при объявлении, преобразовании и прекращении функционирования ООПТ социально-экономические интересы имеют приоритет над экономическими [1]. Управление ООПТ с наиболее ценными природными комплексами и объектами, в том числе Березинским биосферным заповедником, национальными парками и 26 заказниками республиканского значения, осуществляет 31 государственное природоохранное учреждение (ГПУ).

В систему ООПТ Республики Беларусь включены 1 заповедник – Березинский биосферный заповедник, 4 национальных парка – Беловежская пуша, Браславские озера, Нарочанский и Припятский; заказники и памятники природы республиканского и местного значения (рис. 1) [2]. По данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, удельный вес площади ООПТ страны по состоянию на 01.01.2024 г. достиг 9,1 % и составил 1 900,5 тыс. га. Наибольшая часть территорий ООПТ приходится на заказники – 74 %.

В 2014 г. утверждены Национальная стратегия развития системы ООПТ до 01.01.2030 г. и схема рационального размещения ООПТ республиканского значения до 01.01.2025 г., основная цель которых – обеспечивать охрану природных экосистем, биологического и ландшафтного многообразия, устойчивого использования его компонентов [3]. Система ООПТ призвана выполнять следующие функции: сохранение биологического разнообразия, в том числе генетического фонда; сохранение качества пресной воды и атмосферного воздуха; адаптация к глобальному изменению климата, в том числе предотвращение неблагоприятных климатических явлений; поглощение диоксида углерода; сохранение природного и культурного наследия.

ООПТ Республики Беларусь получили международное признание и в соответствии с международными договорами включены во всемирную сеть биосферных резерватов ЮНЕСКО; списки объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО; списки водно-болотных угодий международного значения; изумрудную сеть ценных природных комплексов и объектов международного значения; трансграничные ООПТ, граничащие между собой ООПТ Республики Беларусь и сопредельных государств. В Беларуси 3 ООПТ имеют статус биосферных резерватов ЮНЕСКО: Березинский биосферный заповедник, Национальный парк «Беловежская пуща» и заказник республиканского значения «Прибужское Полесье».



Рис. 1. Система ООПТ Республики Беларусь на 01.01.2024 г.
*Без Полесского радиационно-экологического заповедника.

В пределах ООПТ проживает примерно 80 % редких и находящихся под угрозой исчезновения диких растений и примерно 90 % диких животных. На данный момент в Республике созданы и осуществляются программы по охране диких растений и диких животных, внесенных в Красную книгу Республики Беларусь; предполагается передать под охрану пользователям земельных участков и водных объектов площадь не менее 9 600 га; разработаны планы управления белорусской популяцией зубра; медведя, рыси и барсука.

В 2018 г. указом Президента Республики Беларусь № 108 «Об экологической сети» была утверждена схема национальной экологической сети, которая определяет основные элементы национальной экологической сети; мероприятия по формированию и функционированию элементов национальной экологической сети [4].

Например, на землях республиканских заказников необходимо проводить работы по обнаружению и передаче под охрану мест проживания диких животных и мест произрастания дикорастущих растений, занесенных в Красную книгу Республики

Беларусь, характерных и редких природных ландшафтов и биотопов. При планировании и постройке участков автомобильных дорог нужно осуществлять меры, направленные на предотвращение смерти диких животных в местах их массовой сезонной миграции.

Одной из актуальнейших проблем, непосредственно связанных с повышением эффективности устойчивого использования ООПТ, является обеспечение функционирования рынка экосистемных услуг. Для улучшения туристической деятельности ГПУ развивают новые направления экотуризма:

- экскурсии на болотоступах и болотоходах (ГПУ «Заказник Ельня»);
- тропление следов диких животных (ГПУ «Заказник Ельня»);
- организация обучения дайвингу (ГПУ «Браслав-Ричи»);
- водные походы на плотах (ГПУ «Заказник Днепро-Сожский»);
- организация наблюдения за зубром европейским (ГПУ «Заказник Озеры»);
- фотоохота на глухариных токах (ГПУ «Заказник Налибокский») и др.

Основными результатами реализации Национальной стратегии развития системы ООПТ до 01.01.2030 г. должны стать следующие:

- завершение формирования национальной экологической сети с учетом оптимизации ее пространственной структуры;

- интеграция национальной экологической сети в экологическую сеть соседних государств и общеевропейскую экологическую сеть путем создания ряда трансграничных ООПТ, в том числе «Заповедное Поозерье» (Республика Беларусь – Российская Федерация) и биосферных резерватов («Березинский биосферный заповедник»).

Таким образом, оптимизация системы ООПТ с учетом экологической сети – первоочередная задача для нынешнего и будущих поколений [5]. В Республике Беларусь предпринимаются всесторонние меры для ее достижения.

Л и т е р а т у р а

1. Об особо охраняемых природных территориях : Закон Респ. Беларусь от 15 нояб. 2018 г. № 150-З // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 23. 01.2025).
2. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь : стат. буклет / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева (пред. редкол.) [и др.]. – Минск, 2024. – 35 с.
3. Национальная стратегия развития системы особо охраняемых природных территорий до 1 января 2030 года : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 2 июля 2014 г. № 649 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 23.10.2023).
4. Об экологической сети : Указ Президента Респ. Беларусь от 13 марта 2018 г. № 108 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 23.10.2023).
5. Ходько, Е. М. Особо охраняемые природные территории Республики Беларусь – приоритетное направление сохранения биологического и ландшафтного разнообразия / Е. М. Ходько // Потребительская кооперация. – 2024. – № 4. – С. 26–31.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

А. В. Таран, Д. И. Горковец

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

Научный руководитель В. В. Киселевич

Рассмотрена схема двухступенчатой испарительной системы кондиционирования воздуха, содержащая теплообменники для утилизации температурного потенциала холодоносителя. Выполнена оценка режимных параметров работы этой системы в климати-

ческих условиях г. Гомеля. Показана целесообразность применения испарительных систем кондиционирования для охлаждения приточного воздуха в административных зданиях.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, испарительное охлаждение, режимные параметры системы, диаграмма обработки воздуха.

Хорошо известно [1], что системы кондиционирования воздуха (СКВ), работающие по принципу испарительного (адиабатного) охлаждения, характеризуются значительно меньшим потреблением электрической энергии в сравнении с традиционными СКВ, оборудованными компрессорно-конденсаторными агрегатами. Наибольшую эффективность испарительные системы кондиционирования воздуха демонстрируют на объектах, расположенных в регионах с сухим и жарким климатом [1, 2]. Вместе с тем последние разработки в области климатического оборудования дают основание утверждать о возможности успешного применения таких систем и в районах с умеренным климатом [2, 3].

Целью настоящей работы является определение режимных параметров двухступенчатой испарительной СКВ для климатических условий г. Гомеля.

Принципиальная схема двухступенчатой СКВ испарительного типа, разработанная авторами [3], изображена на рис. 1.

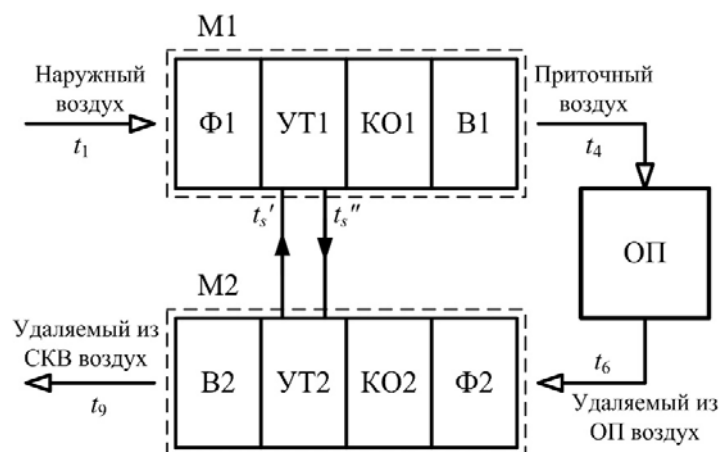


Рис. 1. Принципиальная схема СКВ с двухступенчатым испарительным охлаждением воздуха [3]

Состоит СКВ из двух модулей: приточного (M1), в котором осуществляется подготовка воздуха, подаваемого в обслуживаемое помещение (ОП), и вытяжного (M2), предназначенного для корректировки параметров удаляемого из ОП влажного воздуха. В состав модулей M1 и M2 входят: механические фильтры Ф1 и Ф2, теплообменные аппараты УТ1 и УТ2 для утилизации температурного потенциала промежуточного холодоносителя, оросительные камеры КО1 и КО2, вентиляторы В1 и В2. На схеме рис. 1 показаны только основные функциональные блоки СКВ, реализующие процессы обработки воздуха в теплый период года.

Работа испарительной СКВ осуществляется следующим образом. Наружный воздух с температурой t_1 и влажностью d_1 проходит через фильтр Ф1 и затем охлаждается до t_2 в теплообменнике УТ1, через который циркулирует промежуточный холодоноситель – водный раствор этиленгликоля. После УТ1 воздух поступает в оросительную камеру КО1, где происходит его адиабатное (при постоянной эн-

тальпии h) увлажнение и охлаждение до температуры t_3 . Далее приточный воздух с t_4 нагнетается вентилятором В1 в помещение ОП, где смешивается с внутренним воздухом, имеющим температуру t_5 и относительную влажность φ_5 . Воздух с t_6 , удаляемый из ОП, направляется на вторую ступень обработки в блоки модуля М2. В них последовательно реализуется ряд процессов, направленных на изменение состояния выбрасываемого в атмосферу воздуха: фильтрация в секции Ф2, испарительное охлаждение до температуры t_7 в камере КО2, нагрев до t_8 в теплообменнике УТ2 и незначительное повышение температуры до t_9 после прохождения В2. Теплообменник УТ2 предназначен для восстановления холодильного потенциала этиленгликоля, нагреваемого в УТ1 от начальной t'_s до конечной t''_s температуры при охлаждении наружного воздуха.

Диаграмма, отражающая перечисленные процессы изменения состояния влажного воздуха для теплого периода года, представлена на рис. 2. Диаграмма построена для двухступенчатой СКВ испарительного типа, эксплуатируемой в климатических условиях г. Гомеля.

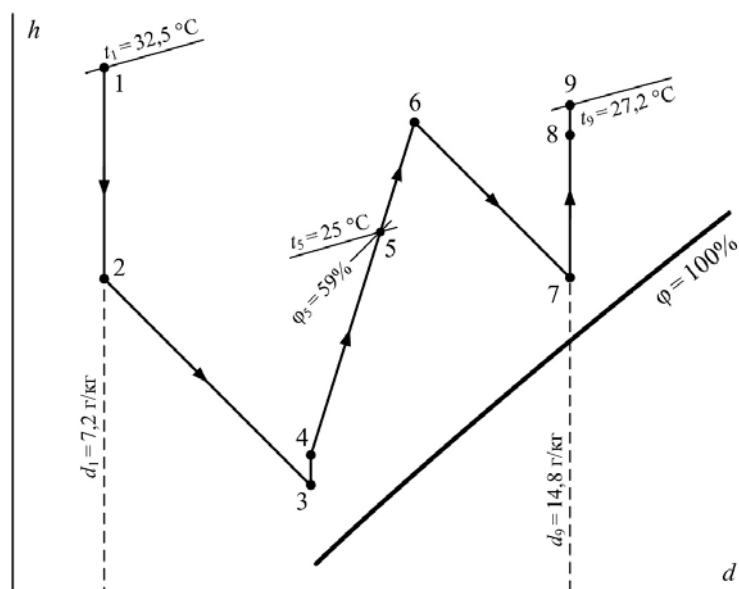


Рис. 2. Диаграмма обработки воздуха в испарительной СКВ для теплого периода года

Значения параметров влажного воздуха для характерных точек h - d диаграммы (рис. 2), определенные нами по методике [3], сведены в таблицу, где через t_w обозначена температура воздуха по мокрому термометру. Из таблицы видно, что в точке 5, характеризующей состояние воздуха в рабочей зоне ОП, основные параметры микроклимата (температура $t_5 = 25$ °C и относительная влажность воздуха $\varphi_5 = 59$ %) соответствуют оптимальным значениям показателей микроклимата на рабочих местах для теплого периода года и категории выполняемых работ Ia [4]: $t = 23$ – 25 °C и $\varphi = 40$ – 60 %. Данное обстоятельство свидетельствует о принципиальной возможности применения испарительных СКВ для создания комфортных условий работы в помещениях административных зданий, расположенных в регионах с умеренным климатом.

**Режимные параметры двухступенчатой испарительной СКВ
для теплого периода года**

Параметр	Характерная точка на $h-d$ -диаграмме								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t, ^\circ\text{C}$	32,5	25,7	17	18	25	28	21,9	26,2	27,2
$t_w, ^\circ\text{C}$	18,4	15,8	15,8	16,3	19,4	20,7	20,7	22	22,3
$\varphi, \%$	24	36	85	84	59	52	90	69	65
$d, \text{г/кг}$	7,2	7,2	10,6	10,6	11,7	12,2	14,8	14,8	14,8

Для установления целесообразности применения СКВ с испарительным охлаждением приточного воздуха необходимо определить величину приращения Δq между количеством холода, вырабатываемого этой СКВ, и количеством теплоты, поступающей в обслуживаемые помещения. Воспользовавшись известными соотношениями теплового баланса для помещений административных зданий [1, 3], можно записать выражение:

$$\Delta q = \frac{Lc_p}{3,6} [\rho(t_6 - t_4) + \rho'(t_5 - t'_4)] - q^+, \text{ Вт},$$

позволяющее оценить величину Δq , приходящуюся на 1 человека. Здесь L – минимальный расход приточного воздуха на 1 человека, $\text{м}^3/\text{ч}$; c_p – изобарная теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ρ и ρ' – значения средней плотности приточного воздуха для дневного и ночного времени суток соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; t'_4 – средняя температура приточного воздуха в ночное время, $^\circ\text{C}$; q^+ – теплопоступления в ОП от людей, оргтехники и солнечной радиации в расчете на 1 человека, Вт.

Для оценки Δq примем следующие значения теплофизических параметров: $L = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$ [5]; $c_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\rho = 1,213 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho' = 1,220 \text{ кг}/\text{м}^3$ [6]; t_4 , t_5 и t_6 смотреть в таблице; $t'_4 = 16,2 \text{ }^\circ\text{C}$; $q^+ \approx 320 \text{ Вт}$ [1, 3, 4]. В результате расчета получим $\Delta q \approx 63 \text{ Вт}$. И, поскольку $\Delta q > 0$, количество холода, производимое испарительной СКВ, обеспечивает компенсацию теплопритоков q^+ без использования парокомпрессионных холодильных машин, что в конечном счете способствует значительному снижению общего электропотребления данной СКВ.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены ключевые особенности функционирования СКВ с двухступенчатым адиабатным охлаждением воздуха, найдены и табулированы режимные параметры испарительной системы кондиционирования воздуха, эксплуатируемой в климатических условиях г. Гомеля, а также показана возможность использования этой системы в теплый период года для обеспечения оптимальных показателей микроклимата в помещениях административных зданий без применения холодильных машин.

Литература

1. Белова, Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях / Е. М. Белова. – М. : Евроклимат, 2006. – 640 с.
2. Вишневецкий, Е. П. Косвенное адиабатическое охлаждение объектов / Е. П. Вишневецкий, Г. В. Малков // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2011. – № 10. – С. 72–75.
3. Кокорин, О. Я. Энергосберегающие методы охлаждения помещений / О. Я. Кокорин, Е. В. Дроздов // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2012. – № 2. – С. 91–97.

4. Микроклиматические показатели безопасности и безвредности на рабочих местах : гигиен. норматив. – 2021.
5. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : СН 4.02.03-2019.
6. Бурцев, С. И. Влажный воздух. Состав и свойства / С. И. Бурцев, Ю. Н. Цветков. – СПб. : СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТУРБОДЕТАНДЕРОВ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А. С. Алексеев

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

Научный руководитель Н. В. Широглазова

Рассмотрен принцип действия турбодетандеров и их схема установки. Описана работа турбодетандера УТДУ-4000, установленного на Гомельской ТЭЦ-2. Представлены результаты работы детандера после установки и запуска в производство, показаны сравнительные характеристики между техническими условиями и фактическими значениями.

Ключевые слова: ресурсосберегающие технологии, природоохранные технологии, детандер-генераторные установки (ДГУ), турбодетандер, потенциальная энергия, механическая энергия, экологичность, возобновляемые источники энергии.

В настоящее время получение электрической энергии с применением ресурсосберегающих, природоохранных технологий становится все более актуальным. И одно из таких направлений – использование потенциальной энергии природного газа высокого давления магистральных газопроводов с применением детандер-генераторных установок (ДГУ)

Целью настоящей работы является: оценка целесообразности применения турбодетандерных установок на современных предприятиях энергетики, с целью экономии топливно-энергетических ресурсов.

Что такое турбодетандер? Турбодетандер или расширительная турбина – это устройство, которое преобразует потенциальную энергию сжатого газа в механическую, а иногда и в электрическую энергию. Принцип работы основан на адиабатическом расширении газа: когда газ проходит через турбину, он теряет давление и температуру, совершая работу. Это охлаждение газа – ключевая особенность, отличающая турбодетандеры от других турбин. Впервые идея использования турбины для таких целей была предложена лордом Рэлеем в 1898 г., но практическая реализация началась только в 1930-х гг.

Принцип действия. Сжатый газ поступает в турбодетандер под высоким давлением через сопловой аппарат, где он разгоняется и направляется на лопасти рабочего колеса. Вращение колеса передает энергию на вал, который может быть соединен с генератором или компрессором. В процессе газ охлаждается – иногда до температуры ниже -150°C . Эффективность турбодетандера оценивается адиабатическим КПД, который может достигать 85–90 % у современных моделей. Важный вклад в развитие технологии внес советский академик Петр Капица, который в 1930-х гг. усовершенствовал конструкцию, повысив КПД с 50 до почти 80 %.

Типы турбодетандеров. Существует несколько типов турбодетандеров в зависимости от их применения.

1. **Детандер-генератор:** преобразует энергию газа в электричество, часто используется на газораспределительных станциях.

2. **Детандер-компрессор:** охлаждает газ и одновременно сжимает его для дальнейшей переработки.

3. **Детандер с гидротормозом (ретардер):** применяется там, где выработка электроэнергии не нужна, а требуется только охлаждение. Каждый тип оптимизирован под конкретные задачи, что делает турбодетандеры универсальными инструментами.

Преимущества и вызовы. Турбодетандеры обладают высокой эффективностью и экологичностью, так как позволяют утилизировать энергию, которая иначе была бы потеряна. Однако есть и сложности: они требуют точной настройки, защиты от обледенения и высококачественных материалов для работы при экстремальных температурах.

Применение турбодетандеров включает следующее:

– криогенные технологии: турбодетандеры – ключевой элемент в производстве сжиженных газов, таких, как кислород, азот или гелий. Например, в установках разделения воздуха они обеспечивают охлаждение до нужных температур;

– переработка природного газа: на газовых промыслах турбодетандеры помогают извлекать этан и сжиженные углеводороды, а также утилизировать энергию дросселирования;

– энергетика: они все чаще применяются для выработки электроэнергии из избыточного давления газа на тепловых станциях.

Применение турбодетандеров на ТЭЦ. В настоящее время в Белорусской энергосистеме начато активное использование детандер-генераторных установок. На сегодняшний день две ДГУ установлены на Лукомльской ГРЭС, две – на Минской ТЭЦ-4. Пятой в энергосистеме установлена ДГУ УТДУ-4000-1,2-2,6-УХЛ4 мощностью 4 МВт на Гомельской ТЭЦ-2.

Схема подачи газа на Гомельскую ТЭЦ-2 происходит следующим образом: небольшая часть газа для надежности газоснабжения основного оборудования подается на ГРП, большая часть газа проходит через ДГУ и используется для выработки электрической энергии. Особенностью схемы подогрева газа на Гомельской ТЭЦ-2 является то, что для подогрева используется сетевая вода после ПСГ-2, т. е. вначале используется низкопотенциальный пар, отработавший в тепловой турбине, дальнейший дополнительный (в случае необходимости) догрев сетевой воды производится в подогревателе газа ДГУ. Важной особенностью данной схемы является то, что до $N_{дгу} = 2,5$ МВт; $Q_{дгу} = 60$ тыс. м³ газа можно обходиться без догрева сетевой воды, что еще более повышает экономичность ДГУ.

Рассмотрим результаты проведенных испытаний после монтажа и пуска в работу в таблице.

Сравнительные характеристики между техническим условием и фактическим значением

Наименование параметра	Тех.условия	Факт
Давление газа на входе в УТДУ, Мпа (абс)	1,2	1,2
Давление газа на выходе из УТДУ, Мпа (абс)	0,09	0,072
Расход через УТДУ, нм ³ /ч	110 000	102 300
Температура на входе в агрегат, °С	90–120	115
Температура на выходе из агрегата, °С	5	5
Мощность УДГУ на клеммах генератора, кВт	4000	4560

Из таблицы видно, что фактические показатели работы превышают заданные в технических условиях.

Таким образом, сегодня интерес к турбодетандерам растет из-за глобального перехода к энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии. Например, в 2023 г. в России был запущен проект по установке турбодетандеров на газопроводах для генерации «зеленой» электроэнергии. В будущем их роль может увеличиться в водородной энергетике и утилизации промышленных выбросов.

Литература

1. Капица, П. Л. Об использовании турбин для получения энергии из сжимаемого газа / П. Л. Капица. – 1930.
2. Коган, М. А. Газовые турбины и турбодетандеры / М. А. Коган, А. Г. Сухарев. – М. : Энергия, 1980.
3. Ветров, А. В. Проектирование газовых турбин и детандеров в энергетике / А. В. Ветров. – М. : Машиностроение, 1999.
4. Попов, И. В. Утилизация энергии газов с использованием турбодетандеров / И. В. Попов // Энергетика. – 2010.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТИПА ПТ

Р. Э. Мастепанов

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

Научный руководитель Н. А. Вальченко

Рассмотрен способ повышения энергоэффективности паровых турбин типа ПТ на основе достижения режима оптимального вакуума. Для реализации режима оптимального вакуума выполнен анализ рациональных режимов работы циркуляционных насосов.

Ключевые слова: повышение экономичности, паровая турбина, турбоагрегаты, турбоустановки, вакуум турбин, оптимальный вакуум, ухудшенный вакуум, углубление вакуума в конденсаторе.

Одним из способов повышения эффективности турбоустановок типа ПТ-50-130 и ПТ-50-90 является достижение режима оптимального вакуума. Данные паровые турбины оснащены конденсаторами типа 50-КЦС-4, количество пара, поступающее в конденсатор, варьируется в зависимости от режима работы турбоагрегата: теплотехнический (от 8–12 т/ч), конденсационный (до 150 – 160 т/ч).

Для реализации режима оптимального вакуума в конденсаторе турбины требуется правильное определение и поддержание в процессе эксплуатации рациональных режимов работы циркуляционных насосов [1].

В ходе определения оптимального вакуума для турбоустановки была определена температура воды на выходе из конденсатора, при величине пропуска пара в конденсатор 40–160 т/ч, а также при расходе охлаждающей воды 1110 кг/с – для одного включенного насоса, а также 2220 кг/с для двух включенных насосов. По результатам расчетов был составлен график (рис. 1) зависимости температуры на входе и на выходе из конденсатора, по которому видно, что температура воды на выходе из конденсатора при двух включенных насосах выше, чем при одном в среднем на 3–10 °С [2].

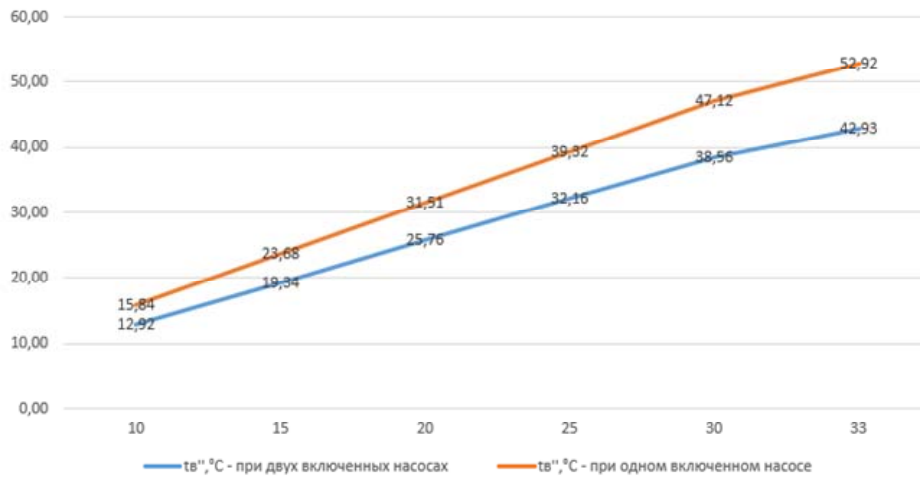


Рис. 1. Зависимость температуры воды на входе в конденсатор от температуры на выходе при включении одного и двух циркуляционных насосов

Так как в эксплуатационных условиях режим оптимального вакуума сводится к выбору наиболее выгодного количества охлаждающей воды и определяется только режимом работы части низкого давления, то в расчетах использовались только следующие основные параметры по пропуску пара в конденсатор D_k , давлению отработавшего пара в горловине конденсатора P_k , температуре охлаждающей воды на входе в конденсатор $t'_в$, мощности на клеммах генератора N_g и на приводе циркуляционных насосов N_n , а также расход охлаждающей воды. По этим данным был построен график (рис. 2) зависимости давления в горловине конденсатора от пропуски пара в конденсатор $P_k = f(D_k)$ при различном включении циркуляционных насосов и соответствующих температурах охлаждающей воды [3].

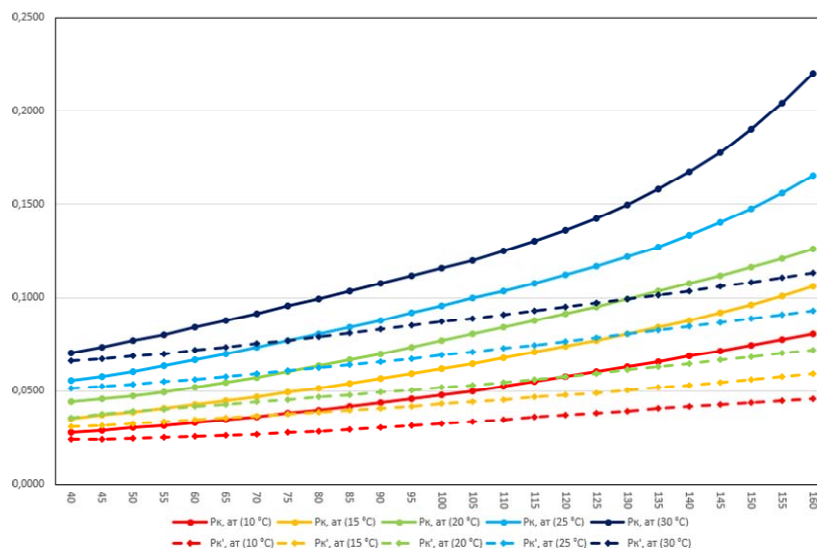


Рис. 2. Зависимость давления в конденсаторе от пропуска пара в конденсатор при различных температурах охлаждающей воды:
 — — — — при одном включенном насосе, — — — — при двух включенных насосах

Из данного графика на рис. 2 были получены значения изменения давления ΔP_k при включении второго циркуляционного насоса для величин D_k и t'_b .

При учете того, что изменение давления на $\pm 0,01$ ат приводит к изменению мощности на ± 445 кВт, определено приращение мощности турбоагрегата при включении второго циркуляционного насоса и построен соответствующий график (рис. 3) $\Delta N = f(D_k)$ [4].

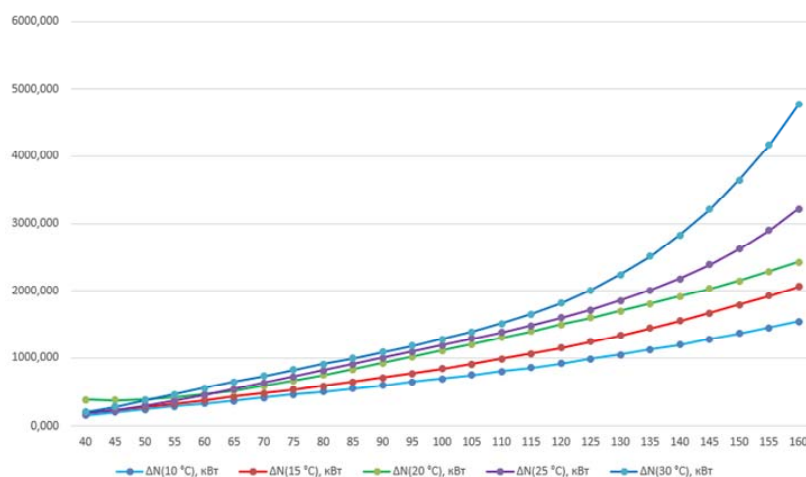


Рис. 3. Изменение приростов мощности при включении в работу второго циркуляционного насоса

По данному графику были определены величины пропускания пара в конденсатор D_k : при 10°C – 56,6 т/ч; при 15°C – 51,8 т/ч; при 20°C – 36,1 т/ч; при 25°C – 50,4 т/ч; при 30°C – 45,4 т/ч.

При данном количестве пара, поступающем в конденсатор турбины, для соответствующей температуры охлаждающей воды выигрыш мощности турбоагрегата за счет углубления вакуума в конденсаторе становится равным затрате мощности на привод второго циркуляционного насоса.

Таким образом, дальнейшее увеличение пропускания пара в конденсатор приведет к приращению мощности на клеммах генератора, которая будет всегда больше дополнительных затрат электрической энергии на привод второго циркуляционного насоса [5].

Л и т е р а т у р а

1. Гумеров, И. Р. Достижение оптимального вакуума в конденсаторе паровой турбины / И. Р. Гумеров, Р. Р. Зайнуллин // Теория и практика современной науки. – 2017. – № 4 (22). – С. 292–295.
2. Вукалович, М. П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин. – М. : Энергоиздат, 1969.
3. Рихтер, Л. А. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций / Л. А. Рихтер, Д. П. Елизаров, В. М. Лавыгин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.
4. Шкловер, Г. Г. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин / Г. Г. Шкловер, О. О. Мильман. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 239 с.
5. Гафуров, Н. М. Возможности достижения предельного вакуума в конденсаторе паровой турбины в зимний период времени / Н. М. Гумеров, Р. Р. Зайнуллин // Форум молодых ученых. – 2017. – № 7 (11). – С. 155–158.

ФИЛЬТРУЮЩИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ НА ОСНОВЕ ТОРФА

К. А. Агунович

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Посвящена изучению сорбционных качеств торфа. Описаны основные загрязняющие вещества из состава промышленных сточных вод, превышающие установленные предельно допустимые концентрации (ПДК) в природных водоемах. Проанализирована возможность использования торфа в качестве эффективного загрузочного материала очистных модулей. Создан экспериментальный фильтрующий модуль. На базе этого лабораторного макета проведена оценка проб, подтверждающая удовлетворительные показатели качества для воды, применяющейся в технических целях.

Ключевые слова: сорбционные материалы, торф, фильтрующий модуль, показатели качества, сточные воды, ПДК.

В связи с увеличением объемов и темпов роста промышленного производства возрастает степень техногенного воздействия на водные объекты как за счет забора воды и планового сброса сточных вод. Мониторинг состояния природных водоемов выявил существенное загрязнение такими примесями, как нитраты, аммонийный азот, фенолы, нефтепродукты, свинец, медь, хром, марганец и др. [7]. Одними из наиболее разнообразных по химическому составу примесей являются сточные воды предприятий машиностроительной промышленности. Наибольшую угрозу экологической безопасности водных объектов представляют ионы тяжелых металлов, а также воды, загрязненные маслами, нефтью и нефтепродуктами (повышенная опасность этих загрязнителей подтверждается величиной установленных для них предельно допустимых концентраций (ПДК) в природных водоемах).

В зависимости от происхождения и вида исходного сырья все сорбенты можно разделить на природные и синтетические. Природные сорбенты, в свою очередь, подразделяются на органические (углеродные), неорганические (неуглеродные) и органо-минеральные сорбенты [4]. Сорбенты различают также и по ряду других признаков: назначению, структуре (порошковые, гранулированные, волокнистые, объемно-пористые), по способу обработки (гидрофобизированные, модифицированные, активированные, комплексные), по пористости, по способу регенерации и утилизации, и другим признакам, что обуславливает необходимость глубокой очистки сточных вод от этих примесей перед сбросом их в водоемы. Среди широкого спектра существующих методов очистки сточных вод одним из наиболее популярных, позволяющим удалить токсические вещества до следовых количеств, является метод сорбции [1].

В качестве сорбентов практически могут служить все мелкодисперсные твердые вещества, обладающие развитой поверхностью – опилки, зола, торф, различные глины, коксовая мелочь и др. [2]. Эти сорбционные материалы, могут использоваться как абсорбенты, поглощающие плавающие загрязнения, а во втором – как адсорбенты, извлекающие тонкодиспергированные и растворенные нефтепродукты. Одной из приоритетных современных задач по защите окружающей среды является замена используемых для очистки сточных вод дорогостоящих сорбентов дешевыми материалами [3].

Важным критерием выбора сорбента является способ его обработки после исчерпания сорбционной емкости [6]. Возможны три варианта его переработки: регенерация, приводящая к вторичному загрязнению воды, дальнейшее использование отработанного сорбента в виде вторичного сырья при условии отсутствия в нем вредных и токсичных примесей, и сжигание как наиболее безопасный метод обезвреживания. Рациональным решением проблемы глубокой очистки сточных вод, содержащих нефтепродукты и тяжелые металлы, является использование отечественных сорбентов растительного происхождения, а именно – природного топлива – торфа [5].

Для экспериментальной проверки свойств торфа был собран лабораторный макет, изображенный на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальный фильтрующий модуль на основе торфа

Модуль представляет собой фильтр-кувшин, состоящий из приемной воронки, на которую по резьбе навинчивается картридж. Приемная воронка вместе с картриджем помещается в кувшин. Сверху кувшин закрывается крышкой с защитной крышкой слива.

Фильтр работает следующим образом: загрязненная нефтепродуктами вода наливается в приемную воронку и, проходя через сорбент картриджа, представляющий собой мелко помолотый до определенной фракции брикетированный торф, и два механических фильтра (на входе и на выходе), поступает в нижнюю часть кувшина, предназначенную для очищенной воды.

В ходе проверки были определены такие показатели, как общее солесодержание, хлориды и водородный показатель pH. Полученные данные приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели качества исходной и очищенной воды

Показатели	Солесодержание, мкСм/см	Хлориды, мг/л	pH
Исходная вода	3,65	22,06	7
Вода после очистки	5,38	18,05	6

Таблица 2

Данные по эффективности очистки воды от нефтепродуктов

Номер опыта	рН	Концентрации		Эффективность очистки, %
		Исходной воды, мг/л	После очистки, мг/л	
1	7,9	2442,1	10,3	99,6
2		2011,1	13,8	99,3
3		2011,1	16,1	99,2
4		244,2	6,3	97
5	7,9	48	3,4	93,1
6		48,2	6,3	86,9
7		48,2	8,8	81,7
8		17,2	6,9	60
9		14,4	7,5	48
10		78,1	10,9	86

Полученные данные удовлетворяют нормативам, закрепленным в постановлении Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 30 марта 2015 г.

В результате проведенного исследования возможностей использования торфа в качестве загрузочного материала для очистных модулей экспериментально доказана эффективность удаления загрязняющих веществ, таких, как хлориды, тяжелые металлы и нефтепродукты. Кроме того, использование торфа в очистных системах способствует снижению затрат на эксплуатацию и обслуживание. В условиях Беларуси, где доступность торфа достаточно высока, его применение может стать экономически выгодным решением для малых и средних населенных пунктов, где традиционные методы очистки могут быть слишком дорогими. Таким образом, торф представляет собой многообещающий материал для создания эффективных очистных модулей, что подтверждается положительным опытом его использования.

Литература

1. Патент РФ 2012117711/05. Способ получения реагента для очистки промышленных вод на основе торфа : № 2509060 : заявлено 28.04.2012 : опубл. 2013 / Минаев В. И., Широчин Д. Л., Нестерова В. Г. [и др.] // Бюл. № 31.
2. Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов : постановление М-ва природ. ресурсов и охраны окружающ. среды Респ. Беларусь от 30 марта 2015 г. № 13 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Минск, 2015.
3. Дремичева, Е. С. Торф как сорбент для очистки промышленных сточных вод / Е. С. Дремичева, Н. К. Лаптедутье // Вода: химия и экология: Всероссийский научно-практический журнал. – 2015. – № 8. – С. 63–68.
4. Феофанов, Ю. А. О применении природных сорбентов для очистки воды от нефтепродуктов / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2018. – № 6 (126). – С. 32–38.
5. Бутовская, А. С. Использование торфа для очистки сточных вод / А. С. Бутовская ; Урал. гос. гор.-геол. акад. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-torfa-dlya-ochistki-stochnyh-vod/viewer> (дата обращения: 07.04.2025).
6. Зверева, Э. Р. Исследование свойств торфа, насыщенного нефтепродуктами / Э. Р. Зверева, Е. С. Дремичева, Д. В. Липатов, Е. Н. Макеева // Школа практических инноваций – инже-

- нерному бизнесу региона : материалы Всерос. науч.-практ. конф. памяти проф. А. Н. Шичкова. – Вологда, 2024. – С. 99–102.
7. Использование торфа в качестве сорбента нефти и нефтепродуктов с дальнейшей утилизацией отработанного материала в качестве топлива / Э. Р. Зверева, Е. С. Дремичева, А. А. Эминов, Е. Н. Макеева, Т. Н. Никулина // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 3 (94). – С. 44–57.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБОУСТАНОВОК НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

Д. Г. Шутов

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Рассмотрено использование органического цикла Ренкина в альтернативной энергетике, подчеркивая его возможности по утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов и сжиганию топлива с низкой теплотворной способностью. Обращено внимание на роль промежуточного перегрева в повышении термодинамической эффективности турбоустановок. Для достижения наилучших результатов рекомендовано применение оптимальных термодинамических параметров рабочего тела, что особенно важно для участков высокой и низкой давления турбины.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, низкикипящее рабочее тело, эксергетический анализ, повышение эффективности, хладагент.

Органический цикл Ренкина (ОЦР) является альтернативой классическому паротурбинному циклу. Его применение предпочтительнее (с техникоэкономической точки зрения) при температурах рабочего тела перед турбиной 250 °С и ниже. Это обусловлено снижением эффективности паротурбинного цикла при столь низких значениях температуры рабочего тела, сложностью конструкции и, как следствие, более высокой стоимостью установки. Поэтому ОЦР приобретает все более широкое распространение в альтернативной энергетике для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов, а также при сжигании топлив с низкой теплотворной способностью.

Для анализа метода повышения эффективности турбоустановок (ТУ) на органическом цикле Ренкина рассмотрим два характерных цикла ТУ на ОРЦ: на перегретом паре (рис. 1) и с промежуточным перегревом рабочего тела (рис. 2).

Принцип работы исследуемой схемы следующий: из конденсатора жидкое низкикипящее рабочее тело насосом подается в теплообменный аппарат, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее поступает в турбину, где совершает механическую работу вращения вала, связанного муфтой с генератором электрического тока. В схеме с промежуточным перегревом НКРТ, пройдя часть высокого давления (ЧВД) турбины, снова попадает в котел-утилизатор, где повторно перегревается и поступает в часть низкого давления (ЧНД) турбины. После совершения работы в турбине НКРТ, будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном давлении в теплообменном аппарате, и направляется в конденсатор, где и конденсируется.

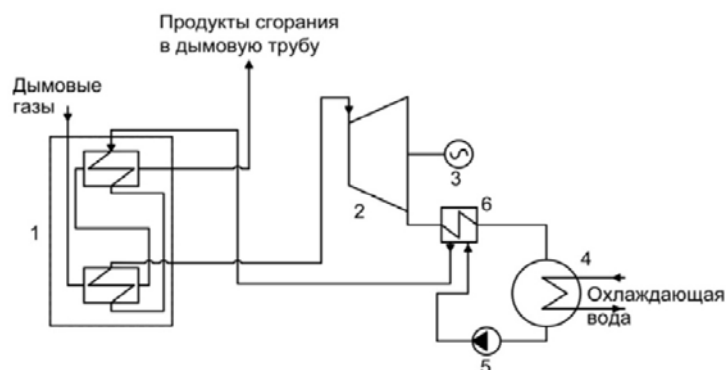


Рис. 1. Схема органического цикла Ренкина на перегретом паре:
1 – котел-утилизатор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор;
5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

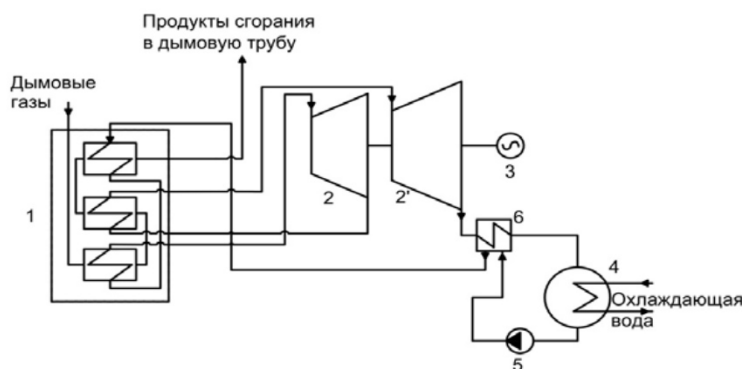


Рис. 2. Схема органического цикла Ренкина
с промежуточным перегревом рабочего тела:
1 – котел-утилизатор; 2 – часть высокого давления турбины;
2' – часть низкого давления турбины; 3 – генератор;
4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

Теоретические исследования. Наиболее подходящим методом термодинамического анализа ОЦР является эксергетический, позволяющий изучать качественную сторону преобразования энергии и степень термодинамического совершенства процессов.

Циклы исследуемых схем с оптимальными параметрами НКРТ представлены на рис. 3, 4. В качестве рабочего тела использован один из наиболее эффективных хладагентов – R245FA, обладающий нулевым потенциалом разрушения озонового слоя и низким потенциалом глобального потепления.

Циклы состоят из следующих процессов: 1–2 – повышение давления НКРТ в насосе; 2–2' – нагрев НКРТ в теплообменном аппарате; 2'–3 – нагрев, парообразование и перегрев в котле-утилизаторе; 3–4 – расширение НКРТ в турбине; 3–3' – расширение в ЧВД турбины; 3'–3'' – перегрев НКРТ в промежуточном перегревателе котла-утилизатора; 3''–4 – расширение НКРТ в ЧНД турбины; 4–5 – охлаждение паров хладагента в теплообменнике; 5–1 – охлаждение и конденсация паров хладагента в конденсаторе.

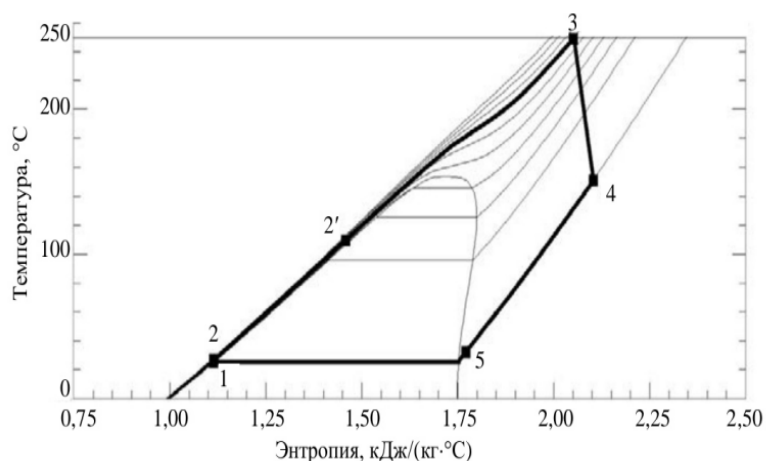


Рис. 3. Эрганический цикл Ренкина на перегретом паре в T - s -координатах

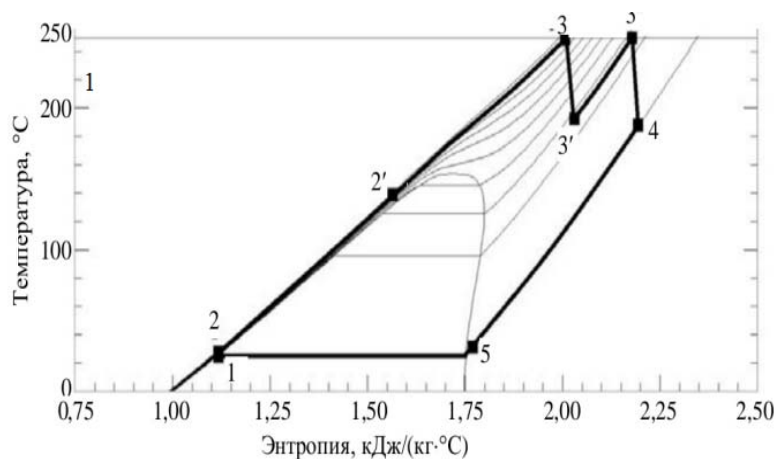


Рис. 4. Эрганический цикл Ренкина с промежуточным перегревом в T - s -координатах

Анализ результатов. Полученные результаты показали, что использование промежуточного перегрева в ОЦР приводит к повышению эксергетической эффективности цикла. В среднем прирост эксергетического КПД составляет 4,28 % на примере хладагента R245FA.

Промежуточный перегрев при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела перед ЧВД и ЧНД приводит к снижению потерь эксергии в котле-утилизаторе, значительному увеличению регенерации в теплообменном аппарате, росту потерь эксергии в насосе (вследствие повышения давления рабочего тела перед турбиной), их перераспределению в турбоагрегате, теплообменном аппарате и конденсаторе (росту потерь эксергии в турбоагрегате и теплообменном аппарате в результате увеличения количества эксергии, поступающей и преобразовываемой в данных аппаратах, снижению потерь эксергии в конденсаторе из-за уменьшения количества рабочего тела, циркулирующего в цикле и, как следствие, поступающего в конденсатор).

Таким образом, применение органического цикла Ренкина актуально в альтернативной энергетике для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетиче-

ских ресурсов, а также при сжигании топлив с низкой теплотворной способностью. Для повышения термодинамической эффективности турбоустановок на органическом цикле Ренкина целесообразно применение промежуточного перегрева. Максимальная эффективность достигается при использовании оптимальных с термодинамической точки зрения параметров рабочего тела перед частями высокого и низкого давления турбины.

Литература

1. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 263–275.
2. Овсянник, А. В. Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 1 (65). – С. 76–88.
3. Ключинский, В. П. Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – № 1 (88). – С. 80–89.
4. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА R404a НА ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

П. С. Колмачева

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Проведены теоретические и экспериментальные исследования теплообмена при конденсации пара и гравитационном ламинарном течении пленки конденсата на вертикальной поверхности. Проверка полученных экспериментальных результатов, рассчитанных по найденным зависимостям, осуществлена расчетным путем по формулам Нуссельта с помощью сравнения представленных результатов с экспериментальными исследованиями процесса конденсации озонобезопасного фреона R404a на наклонных поверхностях с вертикальными и относительно вертикальными ребрами.

Ключевые слова: конденсация, хладагент, теплообмен, фреон, эксперимент, коэффициент теплоотдачи.

Конденсация пара рабочих тел на практике встречается практически во всех теплоэнергетических установках, работающих как по прямому, так и по обратному циклам, и происходит в конденсаторах паросиловых установок, холодильных и в многочисленных теплообменных аппаратах (парожидкостные подогреватели). В подавляющем большинстве случаев конденсация в таких устройствах протекает на охлаждаемых поверхностях теплообмена, и выделенная при фазовом переходе теплота связана теплообменом через охлаждаемую поверхность с нагреваемой средой.

Эксперимент. Проводились экспериментальные исследования процесса конденсации паров смесового чистого озонобезопасного хладагента R404a на продольно-оребренной трубе с ребром трапециевидного профиля высотой 25 мм (рис. 1).

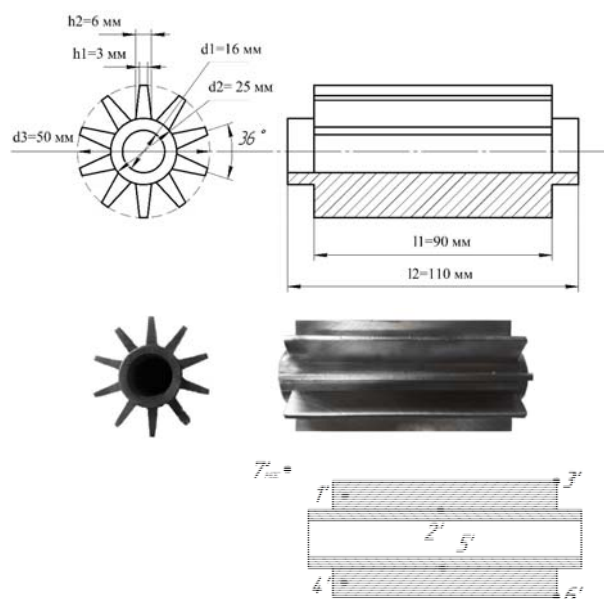


Рис. 1. Экспериментальный образец с расположением термодпар

Для исследования теплообмена при кипении и конденсации жидкостей, озонобезопасных хладагентов и их маслофреоновых смесей на теплоотдающих поверхностях была разработана комплексная экспериментальная установка, показанная на рис. 2.

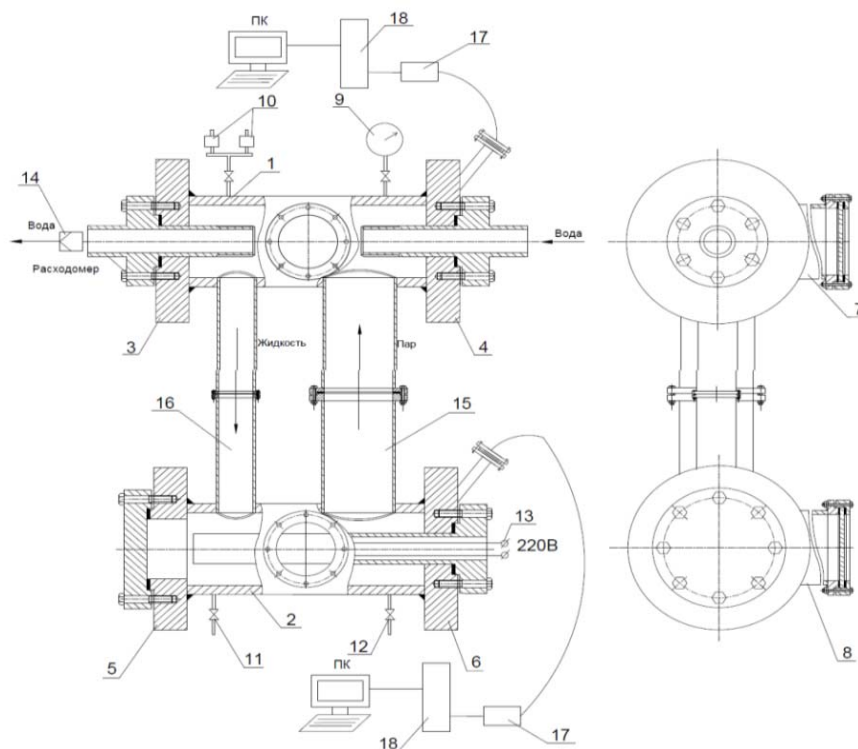


Рис. 2. Экспериментальный стенд [1]:

- 1, 2 – рабочие камеры; 6 – фланцы; 7, 8 – смотровые иллюминаторы;
 9 – манометр; 10 – предохранительный клапан; 11, 12 – вентили; 13 – нагреватель;
 14 – расходомер; 15 – паровой канал; 16 – жидкостной канал;
 17 – аналого-цифровой преобразователь; 18 – компьютер

Рассматривалась пленочная конденсация медленно движущегося сухого насыщенного пара на горизонтальной оребренной трубе, имеющей уклон относительно горизонтальной оси $3\div 5^\circ$. Такой уклон обеспечивает хорошее стекание образующейся пленки конденсата и освобождение поверхности теплообмена, тем самым уменьшая термическое сопротивление пленки конденсата. Температура ребра измерялась в трех точках: в основании, в середине ребра и на его вершине.

В эксперименте определялся коэффициент теплоотдачи по зависимости:

$$\alpha = \frac{q}{t_n - t_c}, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока; t_n – температура насыщения фреона; t_c – температура стенки поверхности теплообмена.

Толщина гравитационно стекающей пленки при ламинарном режиме течения в эксперименте определялась как $\delta_{пл}^э = \frac{\lambda}{\alpha_o}$, и сравнивалась с расчетной толщиной пленки, вычисленной по формуле Нуссельта:

$$\delta_{пл} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot \lambda_{ж} \cdot \mu_{ж} (t_n - t_c) x}{2 \cdot \rho_{ж}^2 \cdot q}}. \quad (2)$$

Результаты экспериментальных и расчетных данных представлены в таблице.

Результаты экспериментальных и расчетных данных

R404a	По Нуссельту		Эксперимент	
Q , Вт	α , Вт/м ² · К	δ , м	α_o , Вт/м ² · К	δ , м
30	3850,627	$1,858 \cdot 10^{-5}$	909,398	$7,865 \cdot 10^{-5}$
120	3216,372	$2,207 \cdot 10^{-5}$	1818,796	$3,903 \cdot 10^{-5}$
285	3192,067	$2,202 \cdot 10^{-5}$	4319,642	$1,627 \cdot 10^{-5}$
800	1965,504	$3,277 \cdot 10^{-5}$	2377,512	$2,709 \cdot 10^{-5}$

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока; толщины пленки от плотности теплового потока; толщины пленки от температурного напора; коэффициента теплоотдачи от температурного напора. Представленные зависимости показывают, что экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи и толщине пленки конденсата хорошо согласуются с расчетными, вычисленными по формуле Нуссельта (рис. 3) в диапазоне плотностей тепловых потоков $q = 5000\text{--}28000$ Вт/м².

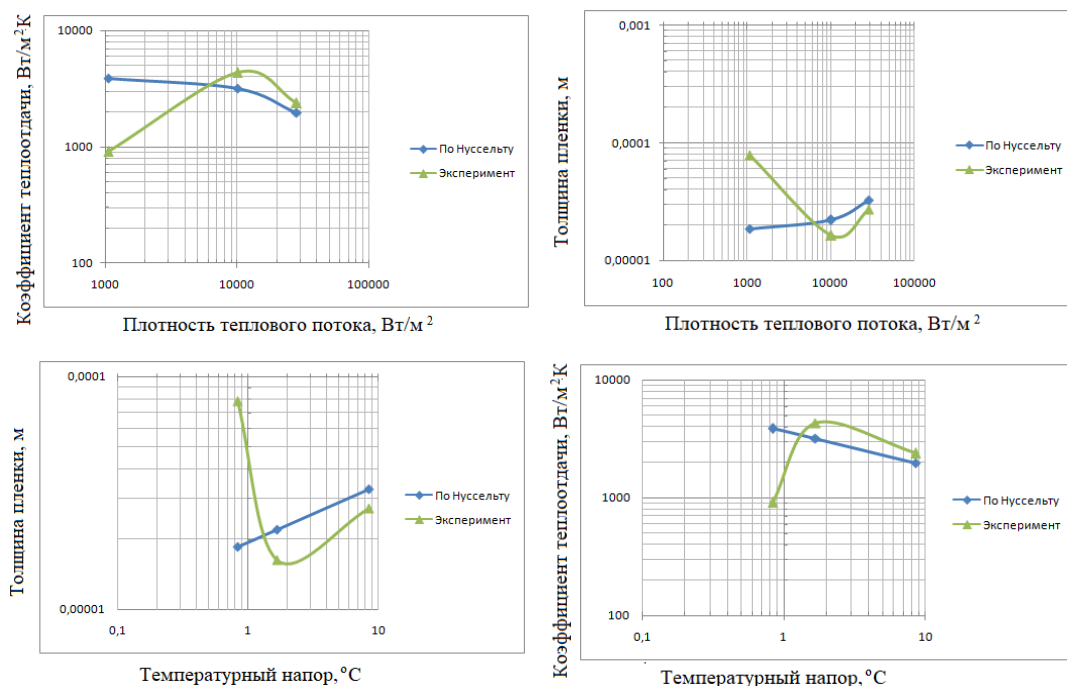


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных и данных по Нуссельту

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса конденсации пара установлены гидродинамические характеристики конденсата, плотность теплового потока и интенсивность процесса теплоотдачи гравитационно стекающей пленки. Экспериментально полученные данные хорошо согласуются с расчетными данными, вычисленными по формуле Нуссельта в диапазоне плотностей тепловых потоков 5000–28000 Вт/м²; максимальная величина неопределенности по толщине пленки конденсата составила $\pm 30\%$, а по коэффициентам теплоотдачи – $\pm 17\%$. Представленные результаты исследований позволят определять наиболее оптимальные режимы работы конденсаторов и конденсационных аппаратов.

Литература

1. Овсянник, А. В. Гидродинамика и теплообмен при течении пленки конденсата по вертикальной поверхности / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 50–57.
2. Овсянник, А. В. Теплообмен при конденсации чистого озонобезопасного хладагента R404A на продольно-ребренных горизонтальных трубах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 58–69.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

И. А. Чупахин

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Тамбовский государственный
технический университет», Российская Федерация

Научный руководитель Н. М. Гребенникова

Отмечено, что основная идея беспроводного устройства зарядки электротранспорта заключается в размещении в нижней части транспортного средства приемника, который

получает энергию от индукционных катушек, расположенных под дорожным покрытием парковочного места на определенном расстоянии друг от друга.

Ключевые слова: катушка, электротранспорт, парковочное место, зарядка.

Современные технологии стремительно развиваются, и с каждым годом растет популярность электрического транспорта. Поскольку все больше людей выбирают электромобили из-за их экологичности и экономичности, необходимость в эффективных и удобных решениях для заряда становится особенно актуальной. Существующие решения, основанные на проводных подключениях, имеют ряд существенных недостатков: механический износ, который приводит устройство в нерабочее состояние, ограниченное количество, большие габариты, а также несовместимость зарядных устройств разных марок автомобилей.

Альтернативой может стать универсальный метод беспроводной зарядки: под днищем электромобиля размещается приемник, получающий энергию от индукционных катушек, встроенных в дорожное покрытие парковочного места (рис. 1). На основе принципиальной схемы беспроводного устройства приобретены составляющие, которые требуются для разработки зарядки [1].

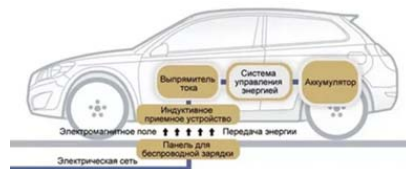


Рис. 1. Схема беспроводной зарядки для электротранспорта

Разработка устройства началась с проверки работоспособности катушки-передатчика и катушки-приемника через фанеру толщиной 6 мм. В ходе размещения фанеры между катушками выявлено, что передача энергии осуществляется и происходят незначительные потери, примерно равные 0,2 В (4 %) (рис. 2).

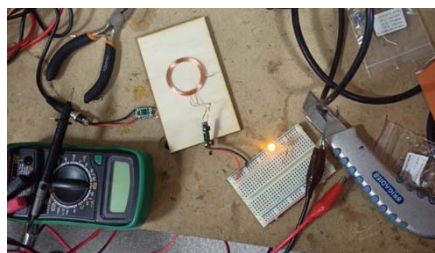


Рис. 2. Передача энергии через материал

Опираясь на схему беспроводной зарядки для электротранспорта, было решено припаять катушку-приемник к дисплею POWERBANK, который подключен к аккумулятору 18650 (рис. 3). После пайки всех элементов устройства для зарядки электротранспорта и проверки их работоспособности было установлено, что при передаче энергии между катушками загорается дисплей POWERBANK [2].



Рис. 3. Проверка работоспособности

Затем предстояла работа над внешним видом беспроводной зарядки для электротранспорта, который состоит из двух частей. Первая часть выглядит как парковочное место, которое разработано в программе КОМПАС-3D и вырезано из фанеры 6 мм (рис. 4). Вторая часть представляет собой модель электротранспорта, для которой используется шасси от машинки на пульте управления.

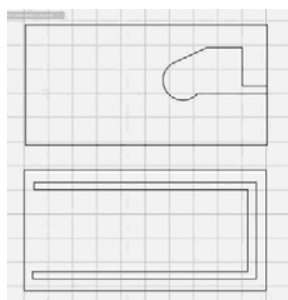


Рис. 4. Эскиз парковочного места

После разработки внешнего вида беспроводной зарядки встал вопрос о универсальности устройства. У различных электромобилей имеется индивидуальный клиренс, который может быть выше рабочего расстояния катушек. Появилась идея доработки зарядки, которая заключается в размещении в модель парковочного места подъемного механизма катушки-передатчика [3].

Подъемный механизм решено делать на основе Arduino Uno и датчика, который, считывая высоту, приводит привод в действие и возвращает его в исходное положение. Предложена схема из Arduino Uno; ультразвуковой дальномер HC SR04; сервопривод; провода для Arduino Uno (рис. 5).

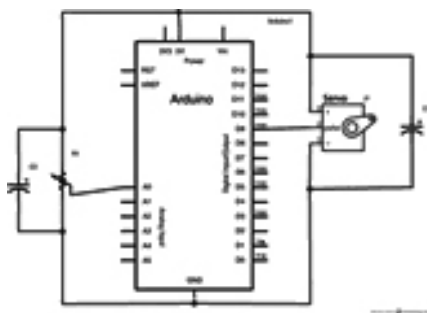


Рис. 5. Электрическая схема подъемного механизма

Возник вопрос написания скетча, который фиксирует высоту и поворачивает сервопривод. Имеющийся скетч для работы сервопривода от ультразвукового дальнотера положил начало дальнейшей работе. Данный код оснащен условиями считывания высоты, по достижению которой сервопривод приводится в движение и возвращается назад. В условии задано значение высоты, которое подходит для работы с машинкой. После этого началась проверка работоспособности цепи.

Убедившись в работоспособности всей цепи, началась разработка системы для сервопривода, осуществляющей поднятие индукционной катушки. Принцип работы механизма поднятия заключается в следующем: сервопривод поворачивает поперечную деталь, которая, в свою очередь, поднимает и опускает катушку-передатчик. В программе КОМПАС-3D сделаны и распечатаны компоненты для создания системы, склеенные для продолжения работы (рис. 6) [4].



Рис. 6. Компоненты конструкции для подъема катушки

Затем разместили подъемный механизм в модель парковочного места, убедившись в том, что все составляющие работают исправно и обеспечивают нужную подъемную силу, произвели конечную сборку (рис. 7).

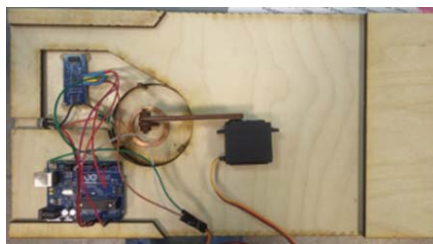


Рис. 7. Конечная сборка

В ходе проведенных исследований был создан опытный образец беспроводной зарядной системы, успешно осуществляющий заряд аккумулятора тестового электромобиля на парковочной площадке.

Ключевыми преимуществами разработанного решения являются: совместимость с различными марками электротранспорта благодаря использованию индукционной технологии вместо фирменных разъемов и повышенная устойчивость к механическому износу по сравнению с традиционными проводными системами.

При этом необходимо отметить, что процесс беспроводной зарядки в текущей реализации требует большего времени по сравнению с проводными аналогами.

Литература

1. Нараянан, Р. Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств / Р. Нараянан В. Рентюк // Компоненты и технологии. – 2015. – № 9. – С. 26–32.
2. Основы робототехники / Н. В. Василенко, К. Д. Никитан, В. П. Пономарев, А. Ю. Смолин. – Томск : МГП «РАСКО», 1993. – 470 с.
3. Камнев, В. Н. Чтение схем и чертежей электроустановок : практ. пособие для ПТУ / В. Н. Камнев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 144 с. : ил.
4. Добровольская, Л. А. Передача энергии в системе из двух контуров для беспроводной зарядки технических устройств / Л. А. Добровольская // The Scientific Heritage. – 2020. – № 44–1 (44). – С. 53–56.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ПАРОТУРБИННОЙ ТЭЦ ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ
СБРОСНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ**

В. В. Янчук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель В. Н. Романюк

Приведены результаты анализа изменения показателей эффективности работы тепловой электрической станции со значительными невозвратами конденсата производственного отбора пара при внедрении в тепловую схему абсорбционного теплового насоса (АБТН), предназначенного для подогрева подпиточной воды за счет утилизации низкотемпературных сбросных тепловых потоков. Рассмотрены два варианта привода АБТН: паром из отбора турбины и продуктами сгорания, отбираемыми из тракта парового котла. Отмечено, что данное решение позволяет уменьшить удельные расходы топлива на выработку единицы электрической энергии, а также уменьшить вредное воздействие на окружающую среду и снизить себестоимость производимой электроэнергии.

Ключевые слова: паровая турбина, подпиточная вода, система регенеративного подогрева питательной воды, абсорбционный тепловой насос, сбросные тепловые потоки.

Укрепление энергетической безопасности любой страны неразрывно связано с повышением эффективности производства и передачи энергии, снижением влияния энергетических объектов на окружающую среду, снижением стоимости производимой энергии.

Основу выработки электрической энергии в Белорусской ОЭС составляют паротурбинные тепловые электростанции (ТЭС), работающие на природном газе. В 2023 г. 70 % всей произведенной электроэнергии в стране получено за счет сжигания природного газа [1].

В тепловой схеме паротурбинной ТЭС неизменно имеются низкотемпературные потоки тепловой энергии, рассеиваемые в окружающую среду, из которых наибольшая мощность есть у потока циркуляционной воды конденсатора паровой турбины. Полезное использование таких потоков усложняется их низкой температурой и требует повышения температурного уровня с использованием тепловых насосов. Учитывая соотношение стоимости тепловой и электрической энергии, оптимальным оказывается использование именно абсорбционных (или теплоиспользующих) тепловых насосов (АБТН), которые требуют для привода поток высокопотенциальной тепловой энергии. Учитывая имеющиеся на ТЭС высокотемпературные потоки, ниже приведено сравнение двух вариантов предлагаемой модернизации: с утилизацией пара из отбора турбины и дымовых газов, отбираемых из тракта парового котла, на привод АБТН.

Суть предложенной модернизации заключается в подогреве подпиточной воды ТЭС в АБТН за счет использования теплоты циркуляционной воды. Данное решение актуально для теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) со значительными невозвратами конденсата производственного отбора и соответственно значительными расходами подпиточной воды. Для Белорусской ОЭС это Гродненская ТЭЦ-2, Мозырская и Новополоцкая ТЭЦ, где невозвраты конденсата составляют 30–100 % [2].

Для варианта использования пара на привод АБТН в соответствии с требуемым температурным уровнем возможно использование пара из регенеративных отборов на ПНД-3, ПНД-4 и отбора на деаэратор. При использовании пара из отбора на деаэратор в [2] получен наибольший рост показателей эффективности во всем диапазоне расходов возвращаемого конденсата. Далее рассматривается именно этот поток.

Для варианта привода дымовыми газами их температура должна быть в диапазоне 300–600 °С с последующим охлаждением до 140–150 °С. Для котлов БКЗ-420, работающих совместно с рассматриваемым типом турбин ПТ-60, место отбора дымовых газов определено в сечении между воздухоподогревателем II ступени и водяным экономайзером I ступени. При этом расход потока дымовых газов через хвостовые поверхности снижается на 10–15 %, а температура на выходе из котла уменьшается до ≈ 110 °С для случая с полным невозвратом конденсата в цикл [3].

В результате предложенной модернизации энергия низкотемпературного потока замещает часть высокопотенциального пара, ранее направляемого для подогрева подпиточной воды. В результате возможно как увеличение электрической выработки станции с сохранением расхода топлива, так и сохранение или снижение выработки электроэнергии со снижением расхода топлива. Для каждого из этих вариантов получено снижение удельного расхода топлива на выработку единицы энергии и повышение показателей эффективности.

Для качественной оценки предлагаемого решения использовались следующие показатели эффективности:

$$\begin{aligned} - \text{электрический КПД } \eta_{\text{эл}} &= \frac{W_{\text{эз}}}{Q_{\text{топл}} - Q_{\text{т.о}} - Q_{\text{п.о}}}; \\ - \text{энергетический КПД } \eta_{\text{эн}} &= \frac{W_{\text{эз}} + Q_{\text{т.о}} + Q_{\text{п.о}}}{Q_{\text{топл}}}, \\ - \text{эксергетический КПД } \eta_{\text{е}} &= \frac{\sum E''}{\sum E'} = \frac{E_{\text{потр}}}{E_{\text{прив}} + E_{\text{утил}}}, \end{aligned}$$

где $W_{\text{эз}}$ – электрическая выработка турбоустановки, ГДж/ч; $Q_{\text{топл}}$ – мощность потока топлива, ГДж/ч; $Q_{\text{т.о}}$ – тепловая нагрузка теплофикационного отбора, ГДж/ч; $Q_{\text{п.о}}$ – тепловая нагрузка производственного отбора, ГДж/ч; E'' – эксергия выходящего из ТН потока, ГДж/ч; E' – эксергия входящего в ТН потока, ГДж/ч; $E_{\text{потр}}$ – эксергия потока к потребителю, ГДж/ч; $E_{\text{прив}}$ – эксергия потока привода, ГДж/ч; $E_{\text{утил}}$ – эксергия утилизируемого потока, ГДж/ч.

В качестве функции цели данной модернизации выбран режим со снижением электрической мощности станции, что соответствует текущим условиям работы Белорусской ОЭС. В таблице ниже приведены результаты исследований.

Рост показателей эффективности станции

Показатель эффективности	АБТН с паровым приводом	АБТН с приводом дымовыми газами
Электрический КПД, %	0,90	4,3
Энергетический КПД, %	0,55	2,6
Эксергетический КПД, %	0,23	1,1

Получено, что использование сбросных тепловых потоков ТЭС для системы регенеративного подогрева питательной воды повышает эффективность использования первичного топлива. Для варианта с паровым приводом АБТН электрический КПД станции повышается на 0,90 %, использование дымовых газов на привод АБТН показывает больший эффект – увеличение электрического КПД на 4,3 %. Для оценки целесообразности данной модернизации требуется также провести оценку экономических показателей.

Литература

1. Our world in data. – Оксфорд, 2024. – URL: <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (дата обращения: 29.03.2025).
2. Янчук, В. В. Модернизация системы регенеративного подогрева питательной воды в цикле турбоустановки ПТ-60 / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – № 6. – С. 509–529.
3. Янчук, В. В. Использование дымовых газов котла для АБТН системы регенеративного подогрева подпиточной воды / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – № 3.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРЕХОАКСИАЛЬНЫХ РАДИАЛЬНЫХ КОМПАКТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

М. С. Бучков

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

Научный руководитель Г. И. Селиверстов

Выполнены исследования электрических и режимных параметров трехоаксиальных радиальных компактных воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Дана сопоставительная оценка их параметров с параметрами традиционных ВЛ.

Ключевые слова: компактная ВЛ, электрические и режимные параметры ВЛ, зарядная мощность, потери мощности и напряжения.

Развитие отраслей промышленности и социальной сферы невозможно без совершенствования и опережающего развития электроэнергетики, в том числе без таких ее составляющих, как системы передачи и распределения электроэнергии.

В целях ускоренного развития систем передачи электроэнергии следует создавать воздушные линии (ВЛ) электропередачи с улучшенными удельными технико-экономическими показателями. Актуальность работы обусловлена поиском новых типов воздушных линий, отличающихся повышенной мощностью и сниженным экологическим влиянием.

Цель работы – исследование электрических и режимных параметров вариантов трехкоаксиальных радиальных компактных ВЛ (далее – компактные ВЛ) [1].

В исследованиях ставилась задача рассчитать и оценить электрические параметры и потери активной мощности и напряжения в компактных ВЛ с тремя проводниками в расщепленной фазе при изменении длины электропередачи L от 1 до 80 км.

Для исследования зависимости потерь активной мощности и потерь напряжения от передаваемой мощности и длины ее передачи рассматривались компактные ВЛ [1, 2] с сечением проводов – АС-95/16, АС-120/19, АС-150/24, АС-185/29 и АС-240/32, а также для сопоставительной оценки – традиционные одноцепные и двухцепные линии такой же длины и таких же сечений проводов. Удельные параметры рассматриваемых вариантов линий (r_0 , x_0 – активное и индуктивное сопротивление; b_0 – емкостная проводимость) принимались на основании данных [1–3]. Электрические параметры вариантов компактных ВЛ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Удельные параметры вариантов трехкоаксиальных радиальных компактных ВЛ напряжением 110 кВ

Удельные параметры	Параметры компактных ВЛ для различных сечений проводов				
	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24	АС-185/29	АС-240/32
r_0 , Ом/км	0,102	0,083	0,066	0,054	0,04
x_0 , Ом/км	0,106	0,106	0,105	0,104	0,103
$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	11,0	11,13	11,13	11,43	11,66

Далее были определены погонные электрические параметры линий – активное сопротивление $R_{\text{л}}$, индуктивное сопротивление $X_{\text{л}}$, емкостная проводимость $B_{\text{л}}$, зарядная мощность $Q_{\text{с}}$. Результаты расчета параметров для линий различных конструкций с сечением провода АС-95/16 даны в табл. 2.

Таблица 2

Электрические параметры компактной ВЛ, традиционной одноцепной и двухцепной линий с проводами марки АС 95/16

Конструктивные и электрические параметры линий электропередачи												
L , км	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}$, 10^{-6} , см	$Q_{\text{с}}$, Мвар	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}$, 10^{-6} , см	$Q_{\text{с}}$, Мвар	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}$, 10^{-6} , см	$Q_{\text{с}}$, Мвар
	Компактная ВЛ				Традиционная одноцепная				Традиционная двухцепная			
1	0,10	0,11	11,0	0,13	0,31	0,43	2,61	0,03	0,15	0,22	5,22	0,06
10	1,02	1,06	109,9	1,3	3,06	4,34	26,1	0,32	1,53	2,17	52,20	0,63
20	2,04	2,12	219,8	2,6	6,12	8,68	52,2	0,63	3,06	4,34	104,4	1,26
30	3,06	3,18	329,7	3,9	9,18	13,02	78,3	0,95	4,59	6,51	156,6	1,89
40	4,08	4,24	439,6	5,2	12,24	17,36	104,4	1,26	6,12	8,68	208,8	2,52

Окончание табл. 2

Конструктивные и электрические параметры линий электропередачи												
L , км	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}$, 10^{-6} , см	$Q_{\text{с}}$, Мвар	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}$, 10^{-6} , см	$Q_{\text{с}}$, Мвар	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}$, 10^{-6} , см	$Q_{\text{с}}$, Мвар
	Компактная ВЛ				Традиционная одноцепная				Традиционная двухцепная			
50	5,10	5,30	549,5	6,5	15,30	21,70	130,5	1,58	7,65	10,8	261,0	3,16
60	6,12	6,36	659,4	7,8	18,36	26,04	156,6	1,89	9,18	13,0	313,2	3,79
70	7,14	7,42	769,3	9,1	21,42	30,38	182,7	2,21	10,71	15,2	365,4	4,42
80	8,16	8,48	879,2	10,4	24,48	34,72	208,8	2,52	12,24	17,4	417,6	5,05

Из табл. 2 видно, что активные сопротивления компактной одноцепной ЛЭП в три раза меньше, чем у традиционной линии, индуктивное сопротивление компактной линии в четыре раза меньше по сравнению с традиционной одноцепной линией и в два раза меньше, чем у двухцепной линии, зарядная мощность компактной линии в 4,5 и 2 раза больше в отличие от традиционной одноцепной и двухцепной линий соответственно.

Принципиальная схема ВЛ электропередачи для исследования ее режимных параметров (активной P , реактивной Q и полной S мощностей, напряжения U) включала источник питания, нагрузку и воздушную линию, их связывающую.

Приведены исходные данные: напряжение источника питания – 115 кВ; за максимальную передаваемую мощность по линии электропередачи принята предельно передаваемая мощность для различных сечений проводов с коэффициентом мощности, равным 0,93 (табл. 3).

Таблица 3

Максимальная передаваемая мощность для различных сечений проводов линий

Марка и сечение проводов	Режимные параметры линии электропередачи		
	P , кВт	Q , квар	S , кВА
АС-95/16	60,43	23,89	65
АС-120/19	69,75	27,57	75
АС-150/24	79,05	31,24	85
АС-185/29	93,0	36,76	100
АС-240/32	111,6	44,11	120

В качестве примера расчеты потерь активной мощности и напряжения ΔU для различных типов линий с сечением проводов АС-95/16 представлены в табл. 4. Результаты анализа расчетов режимов компактной ВЛ и традиционных линий показывают, что потери активной мощности в компактной линии в 3,13 раза ниже, чем в традиционной одноцепной, и в 1,53 ниже, чем в традиционной двухцепной линии при длине передачи электроэнергии 80 км.

Таблица 4

**Результаты расчета потерь мощности и напряжения
для различных типов ВЛ сечением АС-95/16**

Длина линии <i>L</i> , км	Режимные параметры линии электропередачи					
	ΔP , МВт	ΔU , кВ	ΔP , МВт	ΔU , кВ	ΔP , МВт	ΔU , кВ
	<i>Компактная одноцепная</i>		<i>Традиционная одноцепная</i>		<i>Традиционная двухцепная</i>	
1	0,033	0,076	0,099	0,252	0,048	0,124
10	0,323	0,744	0,975	2,49	0,487	1,24
20	0,642	1,46	1,947	4,97	0,970	2,46
30	0,956	2,16	2,915	7,42	1,450	3,65
40	1,266	2,833	3,881	9,85	1,927	4,83
50	1,573	3,481	4,842	12,25	2,400	5,97
60	1,875	4,106	5,801	14,63	2,871	7,1
70	2,173	4,706	6,756	16,98	3,338	8,2
80	2,469	5,283	7,708	19,32	3,802	9,27

Более полно преимущества компактных ВЛ электропередач характеризует степень использования ширины трассы и коридора линий [4] при передаче через них максимального потока электрической энергии в натуральном режиме – удельная величина натуральной мощности, рассчитанная на единицу ширины трассы $P_{\text{нат}}/\text{м}$ и площади поперечного сечения $P_{\text{нат}}/\text{м}^2$.

Величина натуральной мощности на единицу ширины трассы, МВт/м и площади поперечного сечения, МВт/м² для компактной ВЛ напряжением 110 кВ составляет 8,2 и 0,47, для традиционной одноцепной – 2,3 и 0,17, для традиционной двухцепной – 4,4 и 0,24 соответственно; для компактной ВЛ напряжением 220 кВ – 17,9 и 0,72, для традиционной одноцепной – 6 и 0,30, для традиционной двухцепной – 11,47 и 0,53 соответственно.

Литература

1. Селиверстов, Г. И. Разработка новых воздушных компактных электропередач : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Селиверстов Георгий Иванович; Мин. политехн. ин-т. – Минск, 1986. – 19 с.
2. Селиверстов, Г. И. Конструкции и параметры компактных одноцепных линий электропередачи с концентрическим расположением проводов фаз / Г. И. Селиверстов, А. В. Комар, В. Н. Петренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 6. – С. 41–45.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро ; под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.
4. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 648 с.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОЗАБОРА «ИПУТЬ»

П. Н. Лабушев

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

Научный руководитель А. А. Капанский

Рассчитаны энергетические показатели за четыре исследуемых года, такие как коэффициент загрузки, коэффициент включений и коэффициент использования. Также определен ежемесячный объем потребляемой электроэнергии водозабора исследуемых годов и сравнение их до и после января 2024 года. Отмечено, что полученные данные могут быть полезны для самого водозабора при прогнозировании коэффициентов электропотребления от объемов подаваемой воды.

Ключевые слова: электропотребление, насосное оборудование, режимы работы, водозабор.

Водозабор «Ипуть» располагается на территории г. Гомеля и относится к восточному водозаборному сооружению. В состав водозабора входит десять артезианских скважин, станция обезжелезивания, две запасно-регулирующих емкости (резервуаров), насосная станции II-го подъема, хлораторная, сооружение повторного использования промывной воды. Наибольший интерес из этого списка представляют глубинные насосы, располагаемые в скважинах. Заведомо известно, что режим работы этого оборудования в период с 2019 по 2023 г. являлся наиболее стабильным с точки зрения загруженности. Но, начиная с 2024 г. на объекте был прорван один из подающих водоводов в город. Для оценки влияния данного события были получены и оцифрованы следующие данные:

- журнал насосной станции первого подъема воды;
- журнал насосной станции второго подъема воды;
- значения линейных токов по фазам, фазных напряжений и соответствующих значений активной мощности;
- маркировки насосов, располагаемых в глубине артезианских скважин.

Целью работы является оценка влияния произошедшего события на энергетические показатели водозабора, такие как коэффициент загрузки, коэффициент включений и коэффициент использования. Зная эти значения, можно составить их зависимость от объема подаваемой воды водозабора.

Коэффициент загрузки электрооборудования характеризует отношение нагрузки электроприемника в данный момент времени к установленной мощности:

$$k_z = P_{\phi} / P_{1.\text{ном}}, \quad (1)$$

где $P_{\phi} = P_A + P_B + P_C$ – фактическая потребляемая мощность по соответствующим фазам A, B и C, кВт; $P_{1.\text{ном}}$ – номинальная потребляемая мощность электродвигателя, кВт.

Номинальная потребляемая мощность электродвигателя считается как произведение номинальной механической мощности на КПД. Просуммировав активную мощность насоса по фазам и разделив ее на номинальную, получим значение коэффициента для каждой скважины. И так как значения электрических величин известны только за 2019 г., компоновка насосного оборудования по нынешний момент

времени не изменилась и коэффициент не зависит от общей динамики подачи воды, для расчета последующих коэффициентов коэффициент загрузки был принят как основной за 2019 г. Из анализа полученных значений можно сказать, что большинство скважин работают в нормальном режиме – в среднем от 0,8 до 0,96, но также наблюдаем, что три скважины работают в режиме перегрузки, что не является нормой, но допустимо при эксплуатации электрооборудования.

Коэффициент включений зависит от времени работы электрооборудования за некий промежуток времени или фонд времени. В нашем случае был принят месячный фонд рабочего времени января, который составляет 31 день или 744 ч:

$$k_{\text{в}} = \frac{T_{\text{р}}}{T_{\text{м.ф}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{р}}$ – время работы двигателя насоса, ч; $T_{\text{м.ф}}$ – месячный фонд рабочего времени, ч.

Благодаря оцифрованным журналам времени работы каждой скважины за 2019, 2023, 2024 и 2025 гг., можно рассчитать коэффициент включения. Этот коэффициент уже зависит от динамики подачи воды, т. е. чем больший объем воды нужно поднять, тем большее количество времени это займет.

Полученные коэффициенты являются множителями для расчета коэффициента использования. Он характеризует загрузку электрооборудования как по электрической мощности, так и по времени его работы:

$$k_{\text{и}} = k_{\text{з}} \cdot k_{\text{в}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{з}}$ – коэффициента загрузки электроприемника; $k_{\text{в}}$ – коэффициента включения.

Полученные коэффициенты были рассчитаны для каждой скважины за отдельные годы. Возьмем среднее арифметическое значение соответствующих коэффициентов за четыре исследуемых года для построения сводного графика, приведенного на рис. 1. Важно отметить, что как раз в 2019 г., принятом за основной год, значение примерно равняется 0,7, что является стандартом для электрического оборудования в целом. Однако после изменения режима работы наблюдается спад до 0,46.

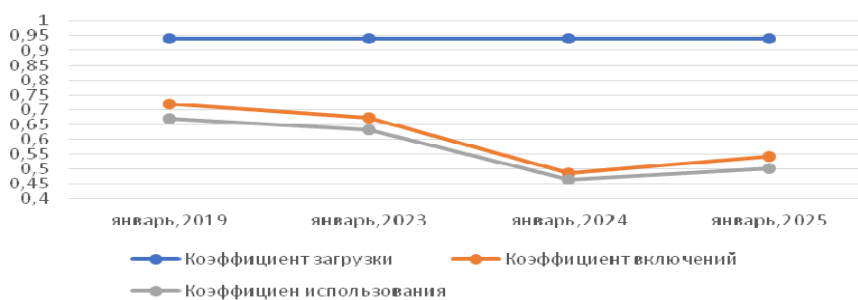


Рис. 1. Сводный график зависимости коэффициентов от исследуемого года

С помощью рассчитанного коэффициента использования, а также полученных данных о номинальной мощности можно определить потребляемую энергию артезианских скважин:

$$W = P_n \cdot k_n \cdot T_{м.ф}, \quad (4)$$

где P_n – номинальная мощность двигателя насоса, кВт; k_n – коэффициент использования, $T_{м.ф}$ – месячный фонд рабочего времени электрооборудования, ч.

На рис. 2 демонстрируются результаты прогнозирования электропотребления насосных агрегатов первого подъема воды в зависимости от исследуемого года.



Рис. 2. Сводный график зависимости потребляемой мощности от исследуемого года

По приведенным графикам теперь можно сделать вывод о том, что в период с 2019 по 2023 г. режимы работы для водозабора являлись стабильными. Однако, начиная с января 2024 г. и до настоящего времени, возникшее аварийное событие привело к значительному снижению энергетических показателей и, как следствие, уменьшению электропотребления. Полученная информация может пригодиться для эксплуатационного персонала водозабора в части анализа влияния загрузки оборудования на энергетическую эффективность, что особенно актуально при подборе стратегий управления насосными станциями. Благодаря представленным результатам, появляется возможность прогнозировать режимы работы оборудования. В связи с чем возникает задача проведения дальнейших исследований по выявлению закономерностей влияния загрузки водозабора на показатели, характеризующие графики электрических нагрузок.

Литература

1. Optimize the cost of paying for electricity in the water supply system by using accumulating tanks / A. Kapanski, N. Hruntovich, S. Bakhur [et al.] // E3S Web of Conferences, Prague, 14–15 May 2020. – Prague, 2020. – P. 01065. – DOI 10.1051/e3sconf/202017801065. – EDN CSSMKC.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОДНОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ГРУПП ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЧАСТНОГО ЖИЛОГО СЕКТОРА

В. В. Павлов, Д. И. Веремеева

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

Научный руководитель А. А. Капанский

Представлен алгоритм проведения однофакторного дисперсионного анализа для данных об электропотреблении частного жилого сектора, который в дальнейшем позволит

найти группы, имеющие значительное сходство, для формирования впоследствии их типовых профилей.

Ключевые слова: электропотребление, бытовой частный дом, однофакторный дисперсионный анализ, множественные сравнения.

Цель исследования заключается в выявлении характера электропотребления для последующего определения пропускной способности сети ввиду роста установленной мощности потребителей. Данные для проведения исследования были получены в ходе выполнения на кафедре «Электроснабжение» НИР «Разработка методики оценки пропускной способности электрических сетей 0,4 кВ в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда». Общий объем данных по электропотреблению одной из деревень составил 18 144 строк времени и 41 столбец домов. Период снятия данных – с августа 2023 г. по август 2024 г.

Очистка массива данных от нехарактерных потребителей. Годовое электропотребление каждого дома представлено на гистограмме (рис. 1). Видно, что некоторые дома имеют незначительное потребление, которое для репрезентативности выборки необходимо исключить из анализа:

1. Минимальное и практически нулевое электропотребление имеют дома 27, 52, 54 и 99, которые исключаются из анализа.

2. В ходе рассмотрения всего электропотребления в выборке было решено установить границу годового электропотребления на 150 кВт/год или 75,0 кВт·ч/год. Выбор граничного условия обусловлен нагрузкой дома 69, которая имеет ярко выраженный характер в летний период, а в зимний период отсутствует. На основании этого из анализа также исключается дом 107.

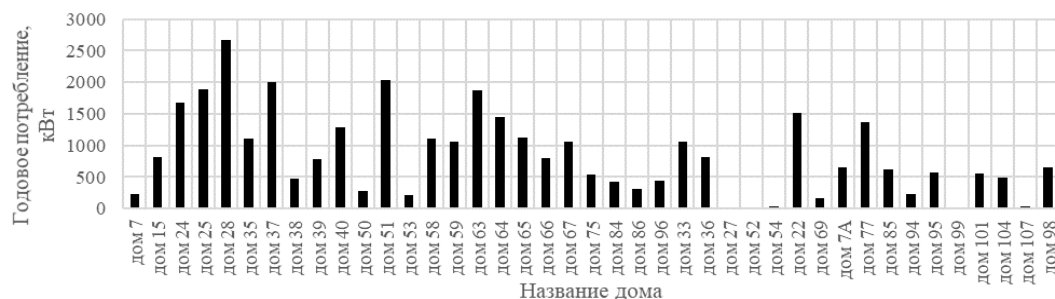


Рис. 1. Анализ годового электропотребления домов

Подготовка данных к проведению ANOVA (однофакторного дисперсионного анализа). Рассмотрение результатов ANOVA. Проведение однофакторного дисперсионного анализа (в дальнейшем – ANOVA) позволяет определить влияет ли фактор электропотребления на различие групп между собой. Данный тест дает возможность определить дальнейшую стратегию формирования типовых профилей.

Перед проведением ANOVA необходимо проверить данные на соответствие критериям, диктуемых данным тестом:

- 1) данные должны иметь количественный характер и должны быть непрерывны;
- 2) выборки должны быть независимы;
- 3) наблюдения должны быть независимы;
- 4) выборки должны соответствовать нормальному распределению;
- 5) должно наблюдаться равенство дисперсий.

Проверка данных на количественный характер и их непрерывность. Данные имеют количественный характер, но непрерывность данных не наблюдается из-за наличия пустот в массиве данных, которые могут быть связаны с ошибками в работе АСКУЭ. Для их заполнения предлагается разбить годовой объем данных по месяцам, а на их местах использовать средние значения, основанные на часе электропотребления и типу дня недели (выходной или будний), усредненные на интервале месяца. Для выполнения этой задачи на языке программирования VBA был реализован код, выполняющий разбивку данных по месяцам и заполняющий пустоты в каждом месяце. Параллельно с выполнением алгоритма формируется таблица, в которой собирается информация об удельном количестве пустых значений в выборке конкретного дома в определенный месяц. Программа также выбирает оптимальный месяц для проведения ANOVA и выделяет этот месяц цветом, при этом данные выделяются по принципу: зеленый – минимальный, желтый – медианный, красный – максимальный. Далее характерный месяц очищается от домов с большим количеством удельного веса нулевых и пустых значений (принята граница 15 %). Так, из ANOVA было решено исключить дома: 7, 39, 58, 75, 84, 36, 69, 7А, 94, 95 (см. таблицу).

Таблица результатов обработки массива

Месяц	Номер дома																																			
	дом 7	дом 15	дом 24	дом 25	дом 28	дом 35	дом 37	дом 38	дом 39	дом 40	дом 50	дом 51	дом 53	дом 58	дом 59	дом 63	дом 64	дом 65	дом 66	дом 67	дом 75	дом 84	дом 86	дом 96	дом 33	дом 36	дом 22	дом 69	дом 7А	дом 77	дом 85	дом 94	дом 95	дом 101	дом 104	дом 98
январь	80	77	77	77	77	77	77	85	79	77	100	77	100	77	77	77	77	77	89	77	82	94	94	83	77	80	78	100	77	77	100	97	87	83	79	77
февраль	3	0	0	0	0	0	0	33	29	0	99	0	99	0	1	0	0	0	49	1	16	38	39	35	0	24	2	99	0	0	83	59	25	17	26	0
март	1	0	0	0	0	0	0	34	22	0	99	0	99	1	0	0	0	0	57	0	17	33	25	11	0	24	1	99	0	0	39	60	27	8	28	0
апрель	12	0	0	1	0	0	0	19	24	0	93	0	96	0	1	0	0	0	59	0	17	1	8	12	1	12	0	72	0	0	9	23	29	6	32	1
май	87	84	84	84	84	84	84	86	87	84	87	84	99	84	84	84	84	84	94	84	88	84	84	90	84	86	84	100	84	84	85	91	89	85	88	84
июнь	64	4	1	1	0	1	1	9	19	0	0	0	47	5	1	0	1	0	64	0	16	22	2	2	0	19	0	92	15	0	2	19	26	8	6	1
июль	85	13	14	17	14	16	15	16	27	14	13	67	99	17	20	14	15	16	79	13	21	19	17	17	16	23	14	22	14	14	18	27	33	18	18	14
август	73	1	0	0	0	0	0	3	12	0	1	42	61	4	42	0	3	0	66	3	19	7	1	30	4	13	0	1	41	0	28	48	26	7	5	0
сентябрь	40	0	0	0	0	0	0	17	5	1	35	0	13	0	100	0	0	0	59	0	19	3	3	47	8	20	0	0	93	0	60	51	30	17	10	0
октябрь	15	0	0	0	0	0	0	19	7	0	88	0	18	0	100	0	0	0	53	0	20	4	12	24	4	18	0	11	89	0	84	44	28	12	25	0
ноябрь	77	74	74	74	74	74	74	79	76	74	100	74	80	76	100	74	76	74	88	74	83	84	78	83	74	77	74	77	91	74	100	95	82	77	84	78
декабрь	6	0	0	0	0	0	0	31	8	0	98	0	94	0	0	0	0	0	51	0	18	89	47	7	0	13	0	58	4	0	100	90	31	14	1	0

Проверка данных выборки на независимость, а также условия независимости наблюдения. Потребление электроэнергии одного дома никак не влияет на потребление другого, что указывает на независимость данных. Наблюдения также являются независимыми, так как на каждого потребителя установлен отдельный прибор учета (электросчетчик).

Проверка данных выборки на соответствие нормальному распределению. Проверку выборок на нормальность можно провести разными способами, но для быстрого и наглядного анализа данных был выбран графический метод – с помощью графиков «ящик с усами» (рис. 2, а). Видно, что данные имеют некоторое количество выбросов у каждого дома, которые находятся за границей 1,5 межквартильного размаха. Для их исключения в VBA был реализован алгоритм, заменяющий значения выбросов на значения линейной интерполяции между предыдущим и следующим получасовым потреблением, не выходящим за межквартильный размах (рис. 2, б).

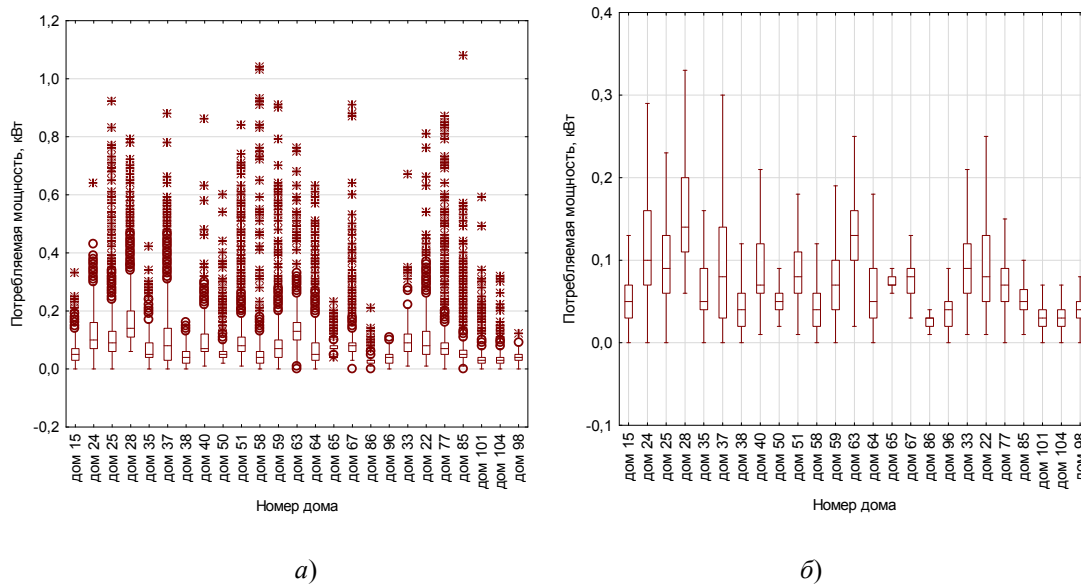


Рис. 2. Диаграмма «ящик с усами» до (а) и после исключения выбросов (б)

Как видно на диаграмме рис. 2, многие данные имеют ненормальное распределение. Так, дом 24 имеет значительно скошенную медиану потребления от середины и неравномерную длину «усов», что отклоняет теорию о нормальности. Тогда для выполнения ANOVA предлагается использовать его непараметрический аналог, а именно – тест Краскела–Уоллиса, основными условиями которого являются все условия ANOVA, кроме условий, подразумевающих нормальность данных.

Формирование гипотез ANOVA и определение уровня значимости. Нулевая гипотеза или H_0 : заключается в том, что статистически значимые отличия между группами (т. е. домами) по фактору (электропотребление) отсутствуют, и сам по себе дом никак не влияет на электропотребление.

Конкурирующая гипотеза или H_1 : заключается в том, что существуют статистически значимые отличия между группами (т. е. домами) по фактору (электропотребления), и дом значительно влияет на электропотребление. Уровень значимости для большинства технических работ принимается на уровне 5 %.

Проведение ANOVA. Для проведения теста Краскела–Уоллиса предлагается использования программного комплекса Statistica, в котором можно легко получить данные теста. Итогом теста является таблица с выведенным уровнем значимости, в нашем случае оно имело значение $p = 0,000$, что меньше принятого нами значения 0,05. Это означает, что группа (дома) оказывает существенное влияние на фактор (электропотребление).

Литература

1. Cohen, A. C. Truncated and censored samples: theory and applications / A. C. Cohen. – CRC press, 2016. – 313 p.
2. Ивановский, Р. И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad / Р. И. Ивановский. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 528 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ г. ГОМЕЛЯ

И. А. Козлов

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

Научный руководитель С. Г. Жуковец

Представлено, что Vehicle-to-Grid(V2G) – перспективное решение для повышения гибкости энергосистемы. Приведены описание и принцип работы технологии. Дано сравнение с альтернативным сценарием замены трансформаторного оборудования малой мощности, показавшее, что V2G обеспечивает более гибкое и масштабируемое решение для распределения нагрузки.

Ключевые слова: Vehicle-to-Grid, V2G, электромобили.

В последние годы электромобили становятся не только средством передвижения, но и важным элементом энергетической системы. В Республике Беларусь, как и во многих других странах, энергосистема сталкивается с проблемами неравномерности нагрузки, особенно в часы пикового потребления. Внедрение технологии Vehicle-to-Grid (V2G) может стать одним из решений этой проблемы, позволяя электромобилям не только потреблять электроэнергию, но и отдавать ее обратно в сеть в нужные моменты. V2G-технология может способствовать стабилизации энергосистемы, играя роль распределенного накопителя энергии.

Приведем описание и принцип работы технологии Vehicle-to-Grid.

Vehicle-to-Grid (V2G) – это технология, позволяющая электромобилям не только заряжаться от электросети, но и отдавать накопленную энергию обратно в сеть при необходимости.

Система V2G включает несколько ключевых компонентов:

1. *Электромобили с двусторонними зарядными системами* – транспортные средства, оснащенные аккумуляторами, способными как накапливать, так и отдавать энергию.

2. *Зарядные станции V2G* – интеллектуальные устройства, обеспечивающие двусторонний поток энергии между сетью и электромобилем.

3. *Система управления энергопотоками* – программное обеспечение, которое анализирует состояние сети и управляет процессами зарядки и разрядки электромобилей.

4. *Энергосистема* – центральная сеть, получающая энергию от электромобилей в периоды пикового потребления и заряжает их в периоды низкой нагрузки.

Когда спрос на электроэнергию в сети высокий, электромобили, подключенные к V2G-станциям, могут передавать часть накопленной энергии обратно в сеть. В периоды низкого потребления они заряжаются, используя избыточную электроэнергию. Такой механизм позволяет значительно сглаживать колебания нагрузки.

В различных странах уже реализуются пилотные проекты по использованию V2G, например:

- *Дания* – одна из первых стран, где электромобили активно используются в качестве распределенных накопителей энергии.

- *Япония* – технологии V2G применяются в экстренных ситуациях для обеспечения резервного питания.

- *США и Великобритания* – проводятся исследования по интеграции V2G в сети с высокой долей возобновляемых источников энергии.

Преимущества технологии V2G:

1. *Выравнивание графиков нагрузки в энергосистеме.* В пиковые часы нагрузка на сеть возрастает, а в ночные часы наблюдается избыток генерации энергии. Электро автомобили с V2G могут поглощать избыточную энергию в периоды низкого спроса и отдавать ее в сеть в моменты пиковой нагрузки, тем самым способствуя стабилизации энергосистемы.

2. *Снижение затрат на модернизацию электросетей.* Традиционно для компенсации пиковых нагрузок требуется строительство дополнительных электростанций и модернизация сетевой инфраструктуры. Однако использование V2G позволяет снизить потребность в таких капиталоемких проектах, перераспределяя нагрузку более эффективно.

3. *Экономическая выгода для владельцев электро автомобилей.* Система V2G дает возможность владельцам электро автомобилей зарабатывать, продавая избыточную электроэнергию обратно в сеть.

4. *Увеличение доли возобновляемых источников энергии.* В Беларуси активно развиваются солнечная и ветровая генерация. Электро автомобили, подключенные к V2G, могут служить буфером, накапливая энергию в периоды высокой генерации и отдавая ее в сеть при снижении производства.

5. *Повышение надежности энергоснабжения.* Электро автомобили с V2G могут служить резервными источниками питания в экстренных ситуациях, например, при отключениях электроэнергии. В случае аварийной ситуации электро автомобили могут питать дома, предприятия или даже критически важные объекты, такие как больницы.

Таким образом, технология V2G имеет потенциал для значительного улучшения работы энергосистемы Гомеля, повышая надежность сети и принося экономическую выгоду как государству, так и владельцам электро автомобилей.

Представим, каким образом можно внедрить технологию V2G:

1. *Развитие зарядной инфраструктуры:*

- установка интеллектуальных зарядных станций с V2G-функционалом;
- модернизация существующих зарядных станций для поддержки двустороннего энергопотока;
- развитие сетевой инфраструктуры для управления распределенной генерацией и накоплением энергии.

2. *Государственная поддержка и нормативно-правовое регулирование.* Для стимулирования внедрения V2G необходимо разработать законодательную базу, регулируюшую:

- тарифы на двусторонний обмен электроэнергией между электро автомобилями и сетью.
- механизмы компенсации владельцам электро автомобилей за участие в балансировке энергосистемы;
- технические стандарты для зарядных станций и электрооборудования.

3. *Внедрение пилотных проектов.* Перед масштабным развертыванием технологии целесообразно провести пилотные проекты в нескольких районах города. Это позволит протестировать работу V2G в реальных условиях и выявить потенциальные проблемы.

В качестве пилотных площадок можно выбрать бизнес-центры, жилые комплексы и государственные учреждения, обладающие парком электро автомобилей.

4. *Популяризация электро автомобилей среди населения и бизнеса.* Рост количества электро автомобилей – ключевой фактор успеха V2G. Для этого необходимо:

- Развивать программы льготного кредитования и покупки электромобилей.
- Стимулировать корпоративные автопарки к переходу на электромобили.
- Проводить информационные кампании, разъясняющие преимущества электромобилей.

5. *Интеграция V2G в общую энергетическую стратегию.* Внедрение V2G должно стать частью долгосрочной стратегии развития энергетики, направленной на повышение устойчивости энергосистемы и интеграцию возобновляемых источников энергии.

Альтернатива замены трансформаторов малой мощности. На уровне распределительных сетей (10–0,4 кВ) часто наблюдаются перегрузки трансформаторов в вечерние часы (особенно в жилых зонах). Вместо замены трансформаторов на более мощные можно разгрузить их за счет отдачи энергии от электромобилей (V2G). Параметры и значения даны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры и значения

Параметр	Значение
Количество электромобилей	1000 шт.
Мощность одного электромобиля	10 кВт
Общая регулируемая мощность	10
Время отдачи в сеть	$2,5 \frac{\text{ч}}{\text{сутки}}$
Энергия, отдаваемая в сеть	$25 \text{ МВт} \cdot \frac{\text{ч}}{\text{день}}$

Рассмотрим гипотетический район с 10 трансформаторными подстанциями:

- существующие трансформаторы: 250 кВА;
- новые: 400 кВА;
- стоимость одного нового трансформатора с монтажом: 120000 BYN.

Однако при внедрении V2G (на 1000 автомобилей в этом районе), можно временно разгрузить сеть на 10 МВт на пике, что эквивалентно увеличению мощности без физической замены трансформаторов. Значения показателей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения показателей

Показатель	V2G (1000 автомобилей)	Замена трансформаторов
Инвестиции	15 000 000 BYN	1 200 000 BYN
Энергия на пике	$25 \text{ МВт} \cdot \frac{\text{ч}}{\text{день}}$	До 2,5 пропускной способности
Гибкость	Высокая (по времени и объему)	Отсутствует
Масштабируемость	Да	Нет
Амортизация	10 лет	25 лет
Экономическая отдача	Есть (ежегодная выгода)	Нет (только показатель надежности)

Таким образом, технология Vehicle-to-Grid (V2G) представляет собой перспективное решение для повышения стабильности энергосистемы и эффективного использования ресурсов. Внедрение V2G может способствовать выравниванию нагрузки на сеть, увеличению доли возобновляемых источников энергии и снижению затрат на модернизацию энергосистемы.

Несмотря на существующие вызовы, такие как износ аккумуляторов, необходимость инвестиций в инфраструктуру и отсутствие нормативно-правовой базы, их преодоление возможно при комплексном подходе.

V2G может отложить инвестиции в замену оборудования, предоставляя временную «буферную» мощность.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ МОЩНОСТЕЙ ПЕРЕТОКА В ЭНЕРГОСИСТЕМУ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ОДНИМ ГЕНЕРАТОРОМ

Ф. С. Запутряев

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

Выполнены исследования влияния изменения длины ЛЭП и $\cos(\varphi_c)$ на запас статической мощности системы электроснабжения. Дана оценка изменения запаса статической мощности в процентах при изменении структуры мощностей перетока в энергосистему.

Ключевые слова: запас статической мощности, ЛЭП, характеристика мощности генератора, структура мощности перетока в энергосистему.

Для электрической системы, приведенной на рис. 1, с генератором, не оснащенным устройством АРВ, требуется:

- определить предел передаваемой мощности;
- определить коэффициенты запаса по мощности и углу;
- построить угловую характеристику мощности;

Расчеты выполнить при приближенном приведении электрических сопротивлений схемы в относительных единицах.

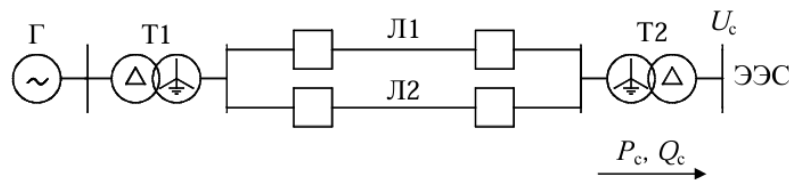


Рис. 1. Расчетная схема электрической системы

Исходные данные даны на рис. 2.

Генератор		Трансформатор 1		ЛЭП		Трансформатор 2		Передаваемая мощность	
$P_{\text{н}}, \text{МВт}$	160	$S_{\text{н}}, \text{МВА}$		200	$x_0, \text{Ом/км}$	0,4	$S_{\text{н}}, \text{МВА}$	240	$P_{\text{с}}, \text{МВт}$
$\cos\varphi$	0,85	$U_{\text{н}}, \text{кВ}$		120	$l, \text{км}$	380	$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	38,5	$Q_{\text{с}}, \text{МВАр}$
$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	10,5	$U_{\text{с}}, \%$		7	$U_{\text{н}}, \%$	115	$U_{\text{с}}, \%$	10	
$x_{\text{д}}, \text{о.е.}$	2,1								

Рис. 2. Исходные данные 1

Принимаем: исходные данные приведены на рис. 3.

$S_{632}=P_c, \text{ МВт}$	80
$U_{632}, \text{ кВ}$	115
<i>Мощности передачи в о.е</i>	
Активная, $P_c=P_c/S_{632}$	1,1875
Реактивная, $Q_c=Q_c/S_{632}$	1,46375
<i>Расчет сопротивлений передачи:</i>	
Генератор, $X_d=x_d \cdot S_{632}/S_{\text{НОМ}}$	0,8925
Трансформатор1, $X_{T1}=U_K \cdot S_{632}/100 \cdot S_{\text{НОМ}}$	0,028
ЛЭП, $X_L=x_0 \cdot l \cdot S_{632}/U_{632, \text{ ЛЭП}}^2$	0,230
Трансформатор2, $X_{T2}=U_K \cdot S_{632}/100 \cdot S_{\text{НОМ}}$	0,033333333
<i>Внешнее сопротивление сети в нормальном режиме</i>	
$X_c = X_{T1} + X_L + X_{T2}$	0,291
<i>Суммарное сопротивление сети с учетом сопротивления генератора по продольной оси</i>	
$X_{d\Sigma} = X_d + X_c$	1,184
Синхронная ЭДС генератора без АРВ	
$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_c x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_c x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2}$	3,073
Напряжение на генераторе	
$U_r = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_c x_c}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_c x_c}{U_c} \right)^2}$	1,468
Предел передаваемой мощности $P_m = E_q \cdot U_c / X_{d\Sigma}$	2,60
Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности $k_p = (P_m - P_c) / P_c$	1,60
Определяем угол сдвига δ_0 между вектором ЭДС генератора E_q и напряжением системы U_c	22,66
Коэффициент запаса статической устойчивости по углу	0,75

Рис. 3. Исходные данные 2

Будем изменять $\cos(\varphi_c)$ от значения 0,63 до 0,9 с шагом 0,09 и вычислим коэффициенты запаса статической устойчивости по углу (k_δ) и мощности (k_p)

При $\cos(\varphi_c) = 0,63$: $k_\delta = 0,75$; $k_p = 1,6$.

При $\cos(\varphi_c) = 0,72$: $k_\delta = 0,72$; $k_p = 1,32$.

При $\cos(\varphi_c) = 0,81$: $k_\delta = 0,68$; $k_p = 1,08$.

При $\cos(\varphi_c) = 0,9$: $k_\delta = 0,64$; $k_0 = 0,85$.

При изменении $\cos(\varphi_c)$ установлено, что при его увеличении от 0,63 до 0,9 коэффициент запаса статической устойчивости по углу уменьшается с 0,75 до 0,64, а коэффициент запаса статической устойчивости по мощности – с 1,6 до 0,85. Запас статической устойчивости по мощности при увеличении $\cos(\varphi_c)$ с шагом 0,09 сокращается в среднем на 22,3 %

Исследуем влияние изменения длины ЛЭП (L) на устойчивость системы электроснабжения.

Будем изменять L от значения 80 км до 600 км с шагами 40 км и 100 км и вычислим коэффициенты запаса статической устойчивости по углу (k_δ) и мощности (k_p).

При $L = 80$ км: $k_{\delta} = 0,76$; $k_p = 1,73$.

При $L = 120$ км: $k_{\delta} = 0,76$; $k_p = 1,71$.

При $L = 160$ км: $k_{\delta} = 0,76$; $k_p = 1,69$.

При $L = 200$ км: $k_{\delta} = 0,76$; $k_p = 1,67$.

При $L = 300$ км: $k_{\delta} = 0,75$; $k_p = 1,63$.

При $L = 400$ км: $k_{\delta} = 0,75$; $k_p = 1,59$.

При $L = 500$ км: $k_{\delta} = 0,74$; $k_p = 1,55$.

При $L = 600$ км: $k_{\delta} = 0,74$; $k_p = 1,52$.

При изменении L установлено, что при увеличении ее от 80 до 200 км с шагом 40 км коэффициент запаса статической устойчивости по углу практически не изменяется, поэтому, начиная с 200 км до 600 км был принят шаг 100 км. Коэффициент запаса статической устойчивости по углу уменьшается с 0,76 до 0,74, а коэффициент запаса статической устойчивости по мощности – с 1,73 до 1,52. Запас статической устойчивости по мощности при увеличении L сокращается в среднем на 2,07 %.

Л и т е р а т у р а

1. Евминов, Л. И. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: пособие для практических занятий по одноименному курсу для студентов энергетических специальностей дневной и заочной форм обучения / Л. И. Евминов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 304 с.
2. Калентионюк, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионюк. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 375 с.
3. Руководящие указания по устойчивости систем. – Минск : Белэнерго, 2005. – 19 с.
4. Голованов, И. Г. Переходные процессы в ЭЭС. Часть 2: Электромеханические переходные процессы : метод. указания по практическим занятиям и самостоятельной работе студентов / И. Г. Голованов. – Ангарск, 2014. – 90 с.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНОЙ НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

М. Г. Гончаров

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

Рассмотрены особенности расчета режимов трехфазной низковольтной электрической сети при несимметричных нагрузках. Алгоритм реализован в программе Mathcad для простейшей схемы. Предложено оценивать степень несимметричности нагрузки по методу симметричных составляющих. Получены зависимости потерь напряжения и мощности в сети в зависимости от степени несимметричности нагрузки.

Ключевые слова: трехфазный, электрическая сеть, проводимость, коэффициент, несимметрия, нагрузка.

Электрические сети жилых и общественных зданий отличаются от электрических сетей в промышленности тем, что почти вся нагрузка этих сетей состоит из однофазных электроприемников, непостоянный режим работы которых приводит к несимметричному режиму работы сети.

Подавляющее большинство компьютерных программ для расчета параметров электрических сетей ориентировано на симметричные трехфазные цепи, т. е. расчеты выполняются фактически как для однофазных цепей, что не учитывает влияние несимметричности нагрузок на расчетные параметры сети. Это актуально для низковольтных систем электроснабжения в общественных и административных зданиях, а также для бытовых потребителей.

Цель данного исследования – проанализировать изменение величины максимальных потерь напряжения в ЛЭП и минимального напряжения на потребителе при различных коэффициентах загрузки трансформатора и коэффициентах несимметрии нагрузки.

Рассмотрим порядок расчета коэффициента несимметрии.

Коэффициент несимметрии нагрузки представляет собой частное модулей проводимостей обратной и прямой последовательностей:

$$K_{нс} = \frac{Y_{обр.посл.}}{Y_{прям.посл.}}. \quad (1)$$

Прямая последовательность проводимости цепи представляет собой сумму разностей проводимостей фаз A и B и фаз B и C , при этом последняя разность должна быть повернута на 120° против часовой стрелки:

$$Y_{прям.посл.} = \left| (Y_1 - Y_2 \cdot e^{-j120^\circ}) + (Y_2 \cdot e^{-j120^\circ} - Y_3 \cdot e^{+j120^\circ}) e^{+j120^\circ} \right|. \quad (2)$$

Обратная проводимость цепи рассчитывается аналогично, только вторая разность поворачивается на 60° по часовой стрелке:

$$Y_{обр.посл.} = \left| (Y_1 - Y_2 \cdot e^{-j120^\circ}) + (Y_2 \cdot e^{-j120^\circ} - Y_3 \cdot e^{+j120^\circ}) e^{-j120^\circ} \right|. \quad (3)$$

Коэффициент несимметрии варьируется в пределах от нуля при симметричной нагрузке до единицы при наличии нагрузки только в одной из фаз.

В качестве примера рассмотрим простейшую трехфазную сеть с одним трехфазным электроприемником. Алгоритмы ее расчета приведены в [1].

Изменяя нагрузку на одной фазе потребителя, для разных коэффициентов несимметрии нагрузки и коэффициентов загрузки трансформатора K_3 , приблизительно равных 1, 0,5 и 0,1 при симметричной нагрузке, будем определять значения максимальных потерь напряжения в ЛЭП δU_{\max} , минимального напряжения на потребителе U_{\min} и максимальных потерь мощности в сети $\delta U_{\text{сети}}$. Графики полученных зависимостей показаны на рис. 1–3.

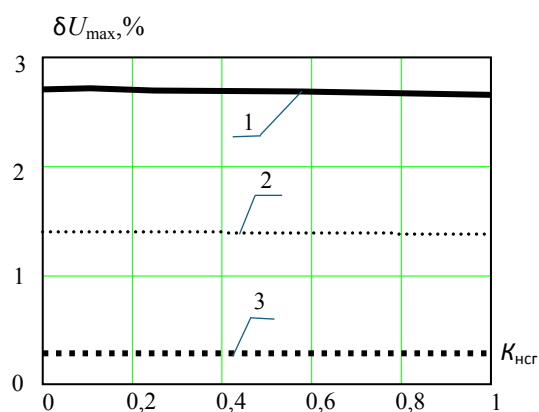


Рис. 1. График зависимости максимальных потерь напряжения в ЛЭП от коэффициента несимметрии нагрузки:
 1 – $K_3 = 1$; 2 – $K_3 = 0,5$; 3 – $K_3 = 0,5$

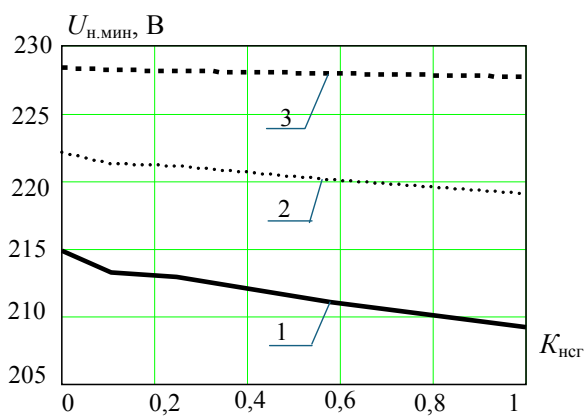


Рис. 2. График зависимости минимального напряжения на потребителе от коэффициента несимметрии нагрузки:
 1 – $K_3 = 1$; 2 – $K_3 = 0,5$; 3 – $K_3 = 0,5$

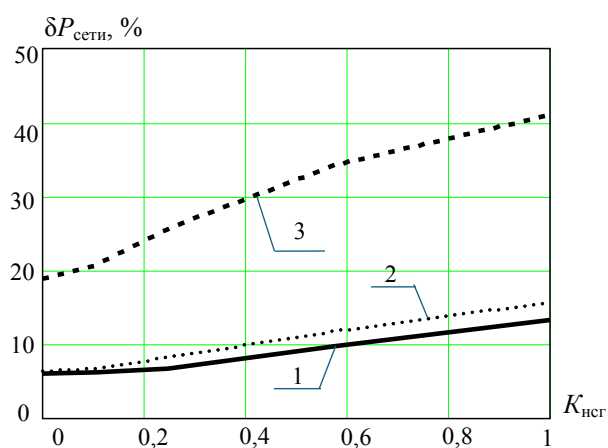


Рис. 3. График зависимости потерь мощности в сети от коэффициента несимметрии нагрузки:
 1 – $K_3 = 1$; 2 – $K_3 = 0,5$; 3 – $K_3 = 0,5$

Как видно из полученных графиков на рис. 1–3, максимальные потери напряжения в ЛЭП прямо пропорциональны значению коэффициента загрузки трансформатора, минимальное напряжение на потребителе значительно уменьшается при несимметричной нагрузке, но остается в пределах допустимых значений. Потери мощности с увеличением несимметрии в сети возрастают более чем в 2 раза, а при низкой нагрузке трансформатора значение потерь делает питание электроприемников экономически неэффективным.

Предложенный способ оценки параметров несимметричных трехфазных сетей может быть использован на этапе их проектирования с целью оценки их технико-экономических показателей.

Л и т е р а т у р а

1. Гончаров, М. Г. Применение матричного метода узловых потенциалов для расчета низковольтных трехфазных электрических сетей / М. Г. Гончаров, Д. И. Зализный // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т : под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – С. 171–172.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНИЙ НОМИНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ 20 кВ

А. А. Харкевич

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

Научный руководитель П. В. Лычев

Проведено сравнение линий электропередачи 10, 20 и 35 кВ по техническим и экономическим показателям. На основе расчетов предельной длины, передаваемой мощности и капитальных затрат обоснована целесообразность внедрения линий 20 кВ в распределительные сети Республики Беларусь. Показано, что линии 20 кВ, выполненные проводом СИП-3, обеспечивают снижение потерь ΔW на 30–50 % по сравнению с 10 кВ при умеренных капитальных затратах. Приведены примеры успешного применения 20 кВ в энергосистеме Беларуси.

Ключевые слова: распределительные сети, линии 20 кВ, ВЛ, потери электроэнергии, экономическая эффективность.

Современные тенденции развития электроэнергетики Республики Беларусь требуют поиска оптимальных решений для модернизации распределительных сетей среднего напряжения. Традиционно используемые линии 10 кВ во многих случаях не удовлетворяют растущим требованиям по пропускной способности и энергоэффективности, в то время как линии 35 кВ остаются малоперспективными.

В этом контексте линии 20 кВ представляют собой перспективное компромиссное решение, сочетающее технические преимущества более высокого напряжения с умеренными капитальными затратами. Основными аргументами в пользу их внедрения являются:

- снижение потерь электроэнергии на 30–50 % по сравнению с линиями 10 кВ;
- увеличение пропускной способности в 2–2,5 раза при том же сечении провода;
- возможность передачи мощности до 13 МВт на расстояния до 10 км.

Целью данной работы является комплексная оценка эффективности линий 20 кВ на основе технического и экономического анализа и практического опыта их внедрения в энергосистеме Беларуси.

Методика исследования включает:

1. *Расчет предельной длины и мощности для линий 10, 20 и 35 кВ по условиям [1]:*

– допустимые потери напряжения $\leq 10\%$ (для 10 и 20 кВ) и $\leq 15\%$ (для 20 и 35 кВ);

– допустимые потери мощности $\leq 10\%$ для 35 кВ.

Предельную длину линии по условию потерь мощности не более 10% будем вычислять по формуле

$$L = \frac{U_{\text{ном}} \cos \varphi (1 - \eta)}{\sqrt{3} \cdot I \cdot r_0}, \text{ км},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение линии; $\cos = 0,9$ – коэффициент мощности нагрузки; η – КПД линии ($\eta = 0,9$); I – ток в линии; r_0 – удельное активное сопротивление в линии.

Предельную длину линии по условию допустимых потерь напряжения будем вычислять по формуле [2]:

$$L = \frac{U_{\text{ном}} \Delta U_{\text{доп}}}{(r_0 + \operatorname{tg} \varphi \cdot x_0) P_{\text{доп}}}, \text{ км},$$

где r_0 и x_0 – удельное активное и реактивное сопротивления линии; $\operatorname{tg} \varphi = 0,484$ ($\cos \varphi = 0,9$) – коэффициент реактивной мощности нагрузки.

Предельную мощность будем вычислять по формуле

$$P_{\text{доп}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{доп}} \cos \varphi \cdot 10^{-3}, \text{ МВт},$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый длительный ток.

Результаты отобразим в виде зависимостей предельной длины и мощности от сечения провода ВЛ (рис. 1).

Зависимости показывают, что для линии 10 кВ предельная длина линии по условию потерь напряжения при предельной передаваемой мощности остается недостаточной для питания удаленных потребителей. В таком случае придется прокладывать несколько линий, или питать этот узел нагрузки от разных ПС, что не всегда бывает возможным и экономически целесообразным. Как раз для таких случаев можно применять напряжение 20 кВ. Как видно из зависимости на рис. 1, предельная длина линии 20 кВ может достигать 10 км, при этом находясь в допустимых пределах по потере напряжения.

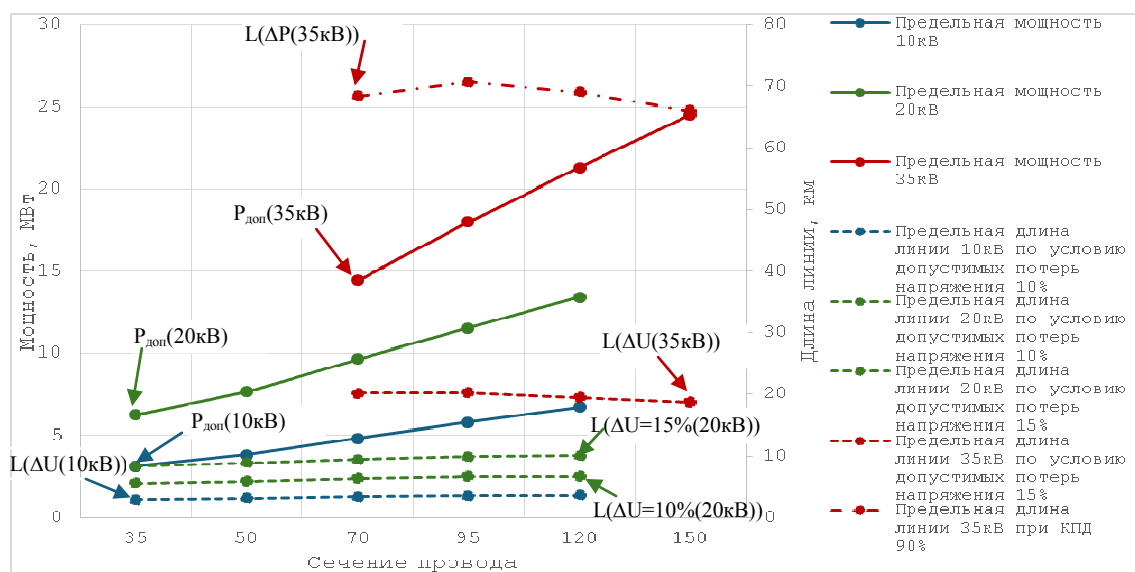


Рис. 1. Обобщенная зависимость предельной длины и предельной передаваемой мощности от сечения провода

2. *Экономический анализ капитальных и эксплуатационных затрат.* При сравнении линий 10, 20 и 35 кВ по капитальным и эксплуатационным затратам выявлены следующие особенности. Линии 10 кВ отличаются наименьшими капитальными затратами благодаря использованию стандартных опор высотой 9–15 м, недорогих трансформаторов и простой арматуры, но имеют высокие эксплуатационные расходы из-за значительных потерь электроэнергии. Линии 20 кВ демонстрируют оптимальное сочетание умеренных капитальных вложений и низких эксплуатационных затрат, что делает их более экономически эффективным решением для распределительных сетей. Линии 35 кВ, несмотря на минимальные потери энергии, характеризуются высокими капитальными затратами.

3. *Практический опыт внедрения в республике Беларусь.* В Республике Беларусь эксплуатируются два ключевых объекта с напряжением 20 кВ: подстанция «Гранитная» 110 кВ и КТПБ «Северный берег» 20 кВ. Применение данного напряжения особенно эффективно при передаче электроэнергии на расстояния 5–10 км, где оно демонстрирует преимущества перед традиционными 10 кВ, устраняя необходимость в прокладке дублирующих линий. Перспективным проектом для внедрения 20 кВ является комплекс по обращению с ТКО в Гомельской области с нагрузкой 3,8 МВт, расположенный в 6 км от подстанции «КПД» 110 кВ.

Таким образом, линии 20 кВ с СИП-3 являются перспективным решением для:

- 1) модернизации сетей 10 кВ с большой нагрузкой для электроснабжения объектов мощностью до 12 МВт удаленных от питающих подстанций (10–15 км);
- 2) снижения потерь электроэнергии без значительного роста затрат.

Литература

1. Фадеева, Г. А. Проектирование распределительных электрических сетей : учеб. пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин ; под общ. ред. В. Т. Фебина. – Минск : Выш. шк., 2009. – 365 с.
2. Герасименко, А. А. Электроэнергетические системы и сети: расчеты, анализ, оптимизация режимов работы и проектных решений электрических сетей : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов н/Д : Феникс, 2018. – 471 с. : ил. – (Высшее образование).

Рис. 1. Схема электрической сети 0,4 кВ поселка Подозерье

Для формирования схемы сети в программе LineCapacity требуется знать марку трансформатора на подстанции (ТП), марку и длину пролетов линий электропередачи (ЛЭП), номер фазы подключения потребителей при однофазном подключении. Фрагмент набранной схемы в программе представлен на рис. 2.



Рис. 2. Фрагмент схемы электрической сети 0,4 кВ поселка Подозерье в программе LineCapacity

Результат расчета режима сети в программе показал, что присутствуют высокие потери напряжения: для летнего периода – 9,7 %, для зимнего – 9,5 %, при допустимых 8 % [1]. Как следствие, пропускная способность сети оказалась недостаточной.

Допустимая пропускная способность может быть достигнута различными методами оптимизации сети. Применение того или иного подхода зависит от полученных результатов.

Анализируя результаты программы, можно отметить, что распределение активной мощности по фазам на шинах ТП асимметрично: фаза *A* – 0 %, фаза *B* – ≈ 55 %, фаза *C* – ≈ 44 %. На схеме электрической сети поселка указано подключение питания потребителей только по фазам *B* и *C*. При оптимизации схемы с целью симметрирования распределения нагрузок в программе было выполнено переключение фаз трех однофазных потребителей. Результаты расчета после оптимизации показали допустимую пропускную способность сети.

Увеличение нагрузки электрической сети населенного пункта может быть, например, при подключении нового потребителя или повышении разрешенной мощности уже существующего потребителя. В качестве примера была рассмотрена ситуация установки электродкотла у случайного потребителя поселка Подозерье. Расчет в программе показал недопустимо высокие потери напряжения. После исследований по оптимизации сети выяснилось, что ее достаточная пропускная способность достигается благодаря увеличению сечений проводов магистральной ЛЭП.

Применение программы LineCapacity существенно упрощает и ускоряет работу при анализе пропускной способности сети. На практических примерах использование программы оправдало себя.

Перспективой дальнейших исследований можно считать проверку точности программы LineCapacity путем сравнения расчетных значений напряжений с реально измеренными значениями в различных населенных пунктах. Для анализируемого поселка расчеты велись при типовых нагрузках, которые возможно оказались завышены, что повлияло на показатели сети.

Таким образом, в данной работе проведен анализ пропускной способности электрической сети поселка Подозерье Чечерского района в программе LineCapacity. По результатам расчетов режимов наблюдалась асимметрия фаз подключения

потребителей и высокие потери напряжения, но после оптимизационных мер были достигнуты приемлемые показатели сети. Также проведен анализ показателей при увеличении нагрузки на сеть, предложены меры по оптимизации сети.

Л и т е р а т у р а

1. Сети электрические распределительные сельские напряжением 0,38–10 кВ. Правила технологического проектирования : ТКП 385-2022 (33240). – Введ. 01.08.2022. – Минск : Минэнерго, 2022. – 69 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕХОДА НАСЕЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЕ ПО ВРЕМЕННЫМ ПЕРИОДАМ ТАРИФЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

Д. И. Веремеева

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

Научный руководитель О. Ю. Пухальская

Рассмотрена оценка эффективности перехода типового потребителя на дифференцированные по временным периодам тарифы на основе предполагаемого суточного электропотребления.

Ключевые слова: дифференцированный тариф, тариф на электроэнергию, электроприбор, потребитель, энергоэффективность.

В последнее время в ряде стран наблюдается переход на дифференцированные тарифы на электроэнергию. Это нововведение находит поддержку как у энергетических компаний, так и у потребителей, для первых – это гарантия эффективного использования оборудования, сглаживание вечерних пиков потребления; для вторых – возможность снизить платежи за электроэнергию. Однако переход на дифференцированный тариф вызывает со стороны населения ряд опасений и вопросов касательно экономии.

Целью работы является оценка эффективности перехода на дифференцированные по временным периодам тарифы на электрическую энергию с точки зрения потребителя.

Предположим, что у нас есть потребитель с достаточно разнообразным списком электроприборов. Потребитель – это семья из трех человек, где двое взрослых, один ребенок. Мать семейства находится в декретном отпуске, поэтому работу по дому при помощи электроприборов она может делать в свободное время, днем.

Для выбора тарифа предполагаем, что квартира потребителя оборудована в установленном порядке электрическими плитами бытовыми стационарными для пищеприготовления и не оборудована в установленном порядке газоиспользующим оборудованием для пищеприготовления [1].

Расчет потребления электроэнергии одним электроприбором определяем по формуле [2]:

$$W = P_{\text{уст}} \cdot T_p \cdot k_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность электроприемника, определенная по паспортным данным, кВт; T_p – продолжительность работы электроприемника за соответствующий

щий период времени, ч; $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования оборудования, определяемый по справочным материалам, либо по данным замеров.

Подбор электроприборов, их технические параметры и предполагаемое время работы представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Электроприборы, их технические параметры
и предполагаемое время работы**

Номер	Электроприбор	$P_{\text{уст}}$, кВт	$k_{\text{и}}$	Время работы, ч
1	Холодильник	0,15	0,6	Циклический режим: 15 мин работы, 20 мин отдыха
2	Электроподогрев (теплый пол)	0,15	0,5	Циклический режим: 3 ч работы, 1 ч отдыха
3	Освещение	0,018	1	6:40–10:00; 18:00–22:40
4	Электроплита	10,5	0,6	6:50–7:15; 12:00–12:40; 16:00–16:50
5	Телевизор	0,1	0,8	6:50–7:30; 18:00–22:00
6	Чайник электрический	1,5	1	7:05–7:10; 13:10–13:15; 18:10–18:15; 20:30–20:35
7	Утюг	1,8	0,6	7:10–7:15
8	Комбайн кухонный	1	0,7	16:05–16:10; 16:17–16:22; 16:29–16:34
9	Стиральная машина	1,5	0,7	19:00–20:10
10	Подзарядное устройство	0,05	0,6	20:00–22:00
11	Машина посудомоечная	2,2	0,8	18:00–19:00
12	Пылесос	2	0,6	9:30–9:40
13	Ноутбук	0,15	0,8	19:00–21:00

Рассчитанные данные для удобства сведены в табл. 2, в которой отображено суммарное потребление электроэнергии за получас и в зависимости от выбранного тарифа: Т1.1 – одноставочный; Т1.2 – дифференцированный по двум временным периодам тариф; Т1.3 – дифференцированный по трем временным периодам тариф; просчитано, сколько оплата за получас, в конце таблицы подведен итог – за сутки, за месяц.

Таблица 2

**Оплата электроэнергии за получас, сутки, месяц
в зависимости от типа тарифа**

Но- мер	Время, ч:мин	Т1.1, бел. руб.	Т1.2, бел. руб.	Т1.3, бел. руб.	$W_{\text{сумм}}$, кВт · ч	Но- мер	Время, ч, мин	Т1.1, бел. руб.	Т1.2, бел. руб.	Т1.3, бел. руб.	$W_{\text{сумм}}$, кВт · ч
1	0:30	0.096	0.067	0.058	0.398	26	13:00	0.151	0.106	0.106	0.626
...
24	12:00	0.005	0.004	0.004	0.023		Сутки	3.42	4.16	3.88	14.17
25	12:30	0.286	0.200	0.200	1.185		Месяц	102.52	124.66	116.54	425.05

Представим анализ результатов: в течение суток самым выгодным по оплате является тариф T1.3, затем – T1.2 и T1.1. В период так называемых «максимальных нагрузок», картина меняется следующим образом: самый выгодный – T1.1, невыгодный – T1.2. Из расчета оплаты за месяц можно сделать вывод, что переход на дифференциальный тариф невыгоден для потребителя: по T1.1 предполагаемый потребитель заплатит 102,52 бел. руб.; по T1.3 – 116,54 бел. руб.; по T1.2 – 124,66 бел. руб. Разница насколько меньше потребитель заплатит, равна: по T1.1 к T1.2 – 17,76 %; T1.3 – 12,03 %.

Исходя из анализа результатов можно понять, что дифференцированный тариф становится невыгодным из-за потребления электроэнергии в «максимумы нагрузки». Можно предложить потребителю методы оптимизации стоимости электроэнергии, такие как включение мощных электроприборов не в «максимумы нагрузки», а в часы «минимальных нагрузок», как вручную, так и при помощи Smart home.

На примере данного потребителя можно дать совет по включению посудомоечной и стиральной машины в другое время, утром или днем.

Приведем анализ результатов после рекомендаций: в течение суток выгодность тарифов не изменилась. Но из расчетов оплаты за месяц можно сделать вывод, что смещение мощных и продолжительных по времени включения электроприборов было оправдано. Переход на дифференцированный тариф стал выгоден для предполагаемого потребителя: по T1.1 потребитель заплатит ту же сумму – 102,52 бел. руб.; по T1.2 – 96,74 бел. руб.; по T1.3 – 92,91 бел. руб. Разница насколько больше потребитель заплатит, следующая: по T1.1 к T1.2 – 5,97 %; T1.3 – 10,34 %.

Таким образом, в работе исследована эффективность перехода населения на дифференцированные по временным периодам тарифы на электрическую энергию. По результатам исследования можно сказать, что для потребителя выгоден переход с одноставочного тарифа, но только при условии, если потребитель будет обдуманно подходить к характеру энергоиспользования и смещать пики нагрузки. Оценка энергоэффективности велась по теоретическим рассуждениям, но все они имеют логическое обоснование, поэтому данный результат оценки может быть применен и в реальности.

Л и т е р а т у р а

1. Об установлении для населения цен на газ, тарифов на электрическую и тепловую энергию, утверждении затрат на единицу оказываемых населению коммунальных услуг газо- и энергоснабжающими организациями Министерства энергетики : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 30 дек. 2013 г. № 1166 : в ред. от 10 февр. 2025 г. № 79 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 25.03.2025).
2. Грунтович, Н. В. Основы энергосбережения : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, В. К. Дебой. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 68 с.

МАЛОГАБАРИТНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Е. В. Авдейчик

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

Разработан малогабаритный аппарат для точечной сварки на основе накопительных конденсаторов. Исследованы энергетические его характеристики аппарата. Отмечено,

что аппарат может быть использован для выполнения множества задач, где требуется надежное соединение металлических элементов.

Ключевые слова: точечная электросварка, управляемый выпрямитель, накопительный конденсатор, разрядник.

Точечная электросварка – это процесс соединения металлических деталей за счет их локального нагрева электрическим током и давления. Она осуществляется на конкретной точке между двумя металлами, через которую протекает значительный ток, достаточный для достижения температуры плавления этих металлов.

Данный вид сварки применяется в таких сферах, как:

- автомобильная промышленность, где точечная сварка необходима для соединения металлических листов в кузовах автомобилей, что обеспечивает прочность и долговечность конструкции;
- аэрокосмическая отрасль, где точечная сварка используется для соединения легких металлов, таких, как алюминий, в производстве самолетов и космических аппаратов;
- электроника – точечная сварка применяется для сборки корпусов приборов;
- производство аккумуляторов – точечная сварка позволяет соединять элементы батарей, обеспечивая их надежность.

Автором данного доклада предлагается малогабаритное устройство для точечной электросварки, функционирующее на основе заряжаемых конденсаторов. Функциональная схема устройства приведена на рис. 1.

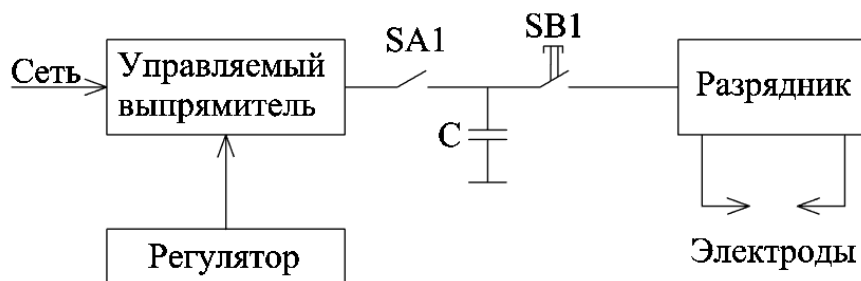


Рис. 1. Функциональная схема работы аппарата точечной сварки

Схема состоит из управляемого выпрямителя, регулятора, выключателя SA_1 , кнопки SB_1 , накопительного конденсатора C , разрядника и медных электродов.

Схема работает следующим образом. Напряжение сети выпрямляется и при замыкании выключателя SA_1 происходит зарядка накопительного конденсатора. Напряжение на конденсаторах зависит от положения регулятора. При размыкании выключателя SA_1 конденсатор остается заряженным. Далее необходимо присоединить электроды к свариваемым элементам и нажать на кнопку SB_1 . При этом конденсатор быстро разряжается в область контакта, через которую протекает ток в несколько сотен ампер, свариваемые металлические поверхности разогреваются и сплавляются.

Внешний вид макета устройства показан на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид макета устройства

Для исследования характеристик установки был проведен эксперимент, в котором электроды были присоединены к металлической пластине, выполненной из константана и имеющей сопротивление 0,3 Ом. В результате получена осциллограмма переходного процесса, приведенная на рис. 3.

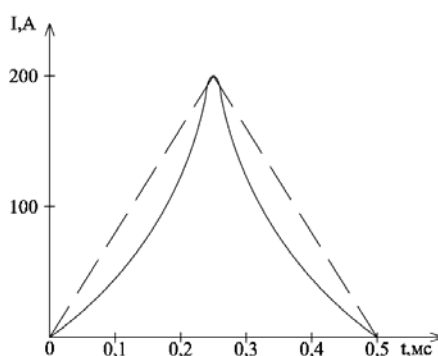


Рис. 3. Осциллограмма тока в цепи разрядника устройства

Выполним расчет энергии, потребленной из сети за один разряд, пользуясь формулой

$$E = R \int_0^T I^2(t) dt, \quad (1)$$

где R – сопротивление металлической пластины; T – период импульса; I – ток.

Заменим форму осциллограммы эквивалентным равнобедренным треугольником (пунктирная линия на рис. 3). Тогда уравнение тока записывается в виде:

$$I(t) = 800 \cdot t. \quad (2)$$

С учетом формулы (2) запишем выражение (1) в виде:

$$E = 2 \cdot R \int_0^{T/2} (800 \cdot t)^2 \cdot dt = 2 \cdot 0,3 \cdot 800^2 \int_0^{0,00025} t^2 \cdot dt = 5,6 \cdot 10^{-13} \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (3)$$

Таким образом, потребление электроэнергии на один разряд крайне незначительно.

Предложенное устройство может применяться в тех случаях, когда невозможно соединить металлические поверхности с помощью процесса пайки. Например, сварка контактов терморпар, соединение контактов солнечных батарей, сварка мест подключения заземления в различном электрооборудовании, в сборке ячеек аккумуляторных батарей, а также во многих других задачах энергетики.

Предполагаемое устройство отличается своими малыми габаритами и небольшой стоимостью. Практическое применение устройства позволит более эффективно выполнять различные виды монтажа электрического и механического оборудования.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОПТОВОЛОКОННЫЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ

Д. А. Ганущак

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

Научные руководители: Т. В. Алферова, А. О. Добродей

Рассмотрены существующие способы повышения надежности работы устройств релейной защиты и автоматики с применением оптоволоконных каналов связи.

Ключевые слова: инновационные технологии, цифровая подстанция, интеллектуальная сеть, надежность, РЗА, оптоволоконные каналы связи.

Решения, влияющие на надежность работы релейной защиты и автоматики (РЗА) и использующих оптоволоконные каналы связи, можно разделить на три отдельные категории:

1. Возможности сетевого оборудования.
2. Схема оптических связей устройств РЗА.
3. Возможности самих устройств РЗА.

1. Возможности сетевого оборудования. К сетевому оборудованию относятся: коммутаторы, преобразователи интерфейсов, сетевые платы устройств РЗА, разного рода преобразователи протоколов. Самыми важными из этого многообразия сетевого оборудования являются сетевые коммутаторы. К ним предъявляются особые требования из-за того, что они должны обеспечить передачу большого количества информации без задержек и потерь. Например, один SV поток (в нем содержится информация о четырех токах и напряжениях) требует ресурсов коммутатора на 5–6 Мбит/с.

Для оптимизации распределения этих потоков данных и обеспечения надежности сети в случае отказа одного из ее элементов необходимо использовать управляемые коммутаторы с возможностью применения протоколов STP/RSTP.

Spanning Tree Protocol – сетевой протокол, работающий на втором уровне модели OSI [1]. Основной задачей STP является приведение сети Ethernet с множественными связями к древовидной топологии, исключающей циклы пакетов. Происходит это путем автоматического блокирования ненужных в данный момент для полной связности портов.

Для определения портов, которые требуется заблокировать, а также портов, находящихся в режиме пересылки, STP выполняет следующий алгоритм:

1. Выбор корневого моста (Root Bridge).
2. Определение корневых портов (Root Port).
3. Определение выделенных портов (Designated Port).

Выбор корневого моста. Корневым становится коммутатор с наименьшим идентификатором моста (Bridge ID).

Только один коммутатор может быть корневым. Для того чтобы выбрать корневой коммутатор, все коммутаторы отправляют сообщения BPDU, указывая себя в качестве корневого коммутатора. Если коммутатор получает BPDU от коммутатора с меньшим Bridge ID, то он перестает анонсировать информацию о том, что он корневой, и начинает передавать BPDU коммутатора с меньшим Bridge ID. В итоге только один коммутатор останется корневым и будет передавать BPDU.

Определение корневых портов. Порт коммутатора, имеющий кратчайший путь к корневому коммутатору, называется корневым портом. У любого не корневого коммутатора может быть только один корневой порт.

Определение назначенных портов. Коммутатор в сегменте сети, имеющий наименьшее расстояние до корневого коммутатора, называется назначенным коммутатором (мостом). Порт коммутатора, подключенный к рассматриваемому сегменту сети, называется назначенным портом.

Существенное достоинство технологии RSTP заключается в том, что в памяти свитчей хранится информация о резервных портах для соединения с корневым мостом в случае неисправности основной сети.

2. Схема оптических связей устройств РЗА. Разработка схемы оптических связей между устройствами РЗА – одна из важнейших задач проектирования цифровой подстанции. Схема связи пассивно влияет на общую надежность системы РЗА. Для повышения надежности каналов связи необходимо использовать протоколы резервирования данных типа HSR/PRP.

Протоколы «бесшовного резервирования высокой доступности» (HSR – High Availability Seamless Redundancy) и «параллельного резервирования» (PRP – Parallel Redundancy Protocol) – это новейшие дополнения к стандарту МЭК 62439 для промышленных Ethernet сетей высокой доступности. Будучи разработанным для критически важных и чувствительных к временным параметрам применений, таких как автоматизация подстанций и управление движением, HSR и PRP обеспечивают гарантированное поведение в неблагоприятных условиях и повышенную надежность сети, а также резервирование сети и бесшовное переключение в случае возникновения отказов.

Протокол параллельного резервирования (PRP) использует две независимые сети с любой топологией, не ограничиваясь только кольцевыми связями. Двумя независимыми параллельными сетями могут быть кольца Turbo Ring, RSTP и даже сети без резервирования вовсе. Основным преимуществом PRP является его переключение без прерываний (бесшовное), которое вообще не затрачивает время на активацию резервирования в случае отказа, тем самым предлагая максимально возможную доступность.

Еще один протокол стандарта МЭК 62439 – кольцо HSR.

В архитектуре HSR основной и резервирующий пакеты отправляются в противоположные направления по кольцу. Принимающая точка обрабатывает первый пакет и отбрасывает дублирующий. Это обеспечивает резервирование на уровне пакетов с бесшовным переходом в случае отказа.

При переводе устройств, поддерживающих протокол RSTP, на работу в сетях PRP/HSR, имеют место проблемы совместимости. Однако на сегодняшний день уже

разработано новое решение, позволяющее использовать гибридные технологии сетей RSTP, PRP и HSR. Таким решением является объединение сети на базе RSTP и сети на базе PRP/HSR с помощью коммутаторов, обеспечивающих преобразование между протоколами RSTP и PRP/HSR.

Объединение принципов резервирования на базе HSR и RSTP могут привести к отказу сети из-за «широковещательного шторма».

3. Возможности самих устройств РЗА. У каждого производителя устройств РЗА, работающих с SV потоками и Goose сообщениями, есть свои уникальные функции по резервированию. Например, терминалы РЗА от «General Electric» используют BRICK (технология HardFiber) [2].

Технология HardFiber позволяет подключить к устройству сопряжения Brick при помощи оптического кабеля до четырех терминалов РЗА. Это принципиальное отличие от философии использования шины процесса. Компания «General Electric» данным решением не использует «общую точку», в которой собирается вся информация о процессах, происходящих на энергообъекте.

Таким образом, наибольшей надежности устройств РЗА можно достигнуть при использовании коммутаторов с возможностью применения протоколов STP/RSTP, обладающих совместимостью с протоколами резервирования данных типа HSR/PRP. По возможности также желательно использовать функции резервирования самих устройств РЗА, если таковые имеются.

Литература

1. jha-tech.com. – URL: <https://clck.ru/3Ksymh> (дата обращения: 06.04.2025).
2. gevernova.com / Multilin HardFiber System. – URL: <https://clck.ru/3Ksz27> (дата обращения: 06.04.2025).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОРЩЕВИКА

Ю. В. Булыгин, П. Д. Алексеев

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Архангельск, Российская Федерация*

Научный руководитель В. К. Любов

Исследован потенциал применения борщевика Сосновского как альтернативного источника топлива. На примере этого инвазивного растения рассмотрены возможности энергетического использования подобных видов флоры. Приведен комплексный анализ борщевика: определение теплотворной способности борщевика, его элементного состава, а также элементного состава его золы. Отдельное внимание уделено практическому аспекту: представлены различные технологические решения для эффективного сжигания данного биоматериала.

Ключевые слова: биомасса, борщевик Сосновского, энергетическое использование, теплотехнические характеристики, твердое топливо, элементный состав.

В эпоху глобальных экологических вызовов человечество активно ищет новые пути получения энергии. Традиционные источники – нефть, природный газ и уголь – не только приближаются к истощению, но и наносят существенный вред экосистеме планеты. Эта ситуация диктует острую необходимость в разработке экологически безопасных и возобновляемых энергоресурсов.

Особое внимание ученых привлекает биоэнергетический потенциал растений, в частности, инвазивных и сорных видов. Использование такой флоры в энергетических целях открывает двойную выгоду: с одной стороны, это способствует рацио-

нальному природопользованию и сохранению лесных массивов, с другой – помогает решить проблему распространения нежелательных растительных видов.

Проблема распространения борщевика Сосновского стала актуальной в России и некоторых других странах в конце XX в. Эта культура, завезенная с Кавказа в качестве кормового растения, продемонстрировала высокую агрессивность и способность к быстрому распространению. Сегодня эта проблема затрагивает большинство регионов России – лишь 16 субъектов Федерации не сталкиваются с данной угрозой. Данная проблема также актуальна и для республики Беларусь.

Научные исследования открыли несколько перспективных направлений использования борщевика. Ученые изучали возможности получения из него технической целлюлозы, его применение как добавки к бетону и производства теплоизоляционных материалов на основе модифицированных стеблей растения.

Еще одним потенциальным направлением использования борщевика может быть изготовление топливных гранул. Для исследования теплотехнических характеристик борщевика Сосновского были собраны образцы данного растения (место сбора – г. Архангельск), включающие различные части: стебли, листья, соцветия и плоды (семена). После естественной сушки до атмосферно-сухого состояния и измельчения образцы прошли комплексное исследование, включающее анализ теплотехнических характеристик биотоплива, определение элементного состава самого растения и образующейся при его сжигании золы.

Исследования показали, что борщевик отлично поддается измельчению в ножевой дробилке после естественной сушки. Анализ полученных данных, приведенных в табл. 1, демонстрирует, что эта растительная масса обладает характеристиками качественного топлива: невысокой зольностью, более высоким содержанием водорода и серы чем у древесных пород, низшая удельная теплота сгорания на горючую массу несколько меньше, чем у древесины тополя [1]. Согласно треугольнику Таннера, представленному на рис. 1, биомасса Борщевика может поддерживать автогенное горение.

Таблица 1

Теплотехнические характеристики биомассы борщевика Сосновского

Величина	Единица измерения	Аналитическая масса	Сухая масса	Горючая масса
Влажность аналитическая	%	21,93	–	–
Зольность	%	6,01	7,70	–
Теплота сгорания низшая	МДж/кг	13,002	–	18,809
Теплота сгорания высшая	МДж/кг	–	–	20,598
Сера общая	%	0,04	0,05	0,06
Водород	%	5,69	7,29	7,90
Выход летучих веществ	%	56,45	72,31	78,34
Коксовый остаток	–	Порошкообразный		
Эквивалент	–	0,443		

Таблица 2

Результаты исследований элементного состава борщевика и его золы

Показатели	Борщевик, %	Показатели	Зола борщевика, %
S	0,052	SO ₃	1,02
Fe	0,032	Fe ₂ O ₃	1,08
K	0,834	K ₂ O	6,51
Ca	1,38	CaO	49,2
Cu	0,003	CuO	0,025
Si	0,133	SiO ₂	4,29
Na	0,567	Na ₂ O	3,26
Mg	0,257	MgO	9,32
Al	0,079	Al ₂ O ₃	1,27
Cr	0,001	Cr ₂ O ₃	0,013
Mn	0,003	MnO	0,061
Zn	0,005	ZnO	0,112
Sr	0,004	SrO	0,069
Cl	0,639	Cl	1,03
Ti	0,006	TiO ₂	0,168
O	45,3	O	20,0
N	1,09	N	<0,1
C	42,2	C	2,09
H	7,29	H	0,167

В соответствии с рекомендациями [2] топлива с содержанием в золе CaO более 13,0 % относятся к сильно загрязняющим. Анализ результатов исследования элементного состава золы борщевика показал, что содержание CaO = 49,2 % более чем в 3 раза превышает пороговое значение. Содержание окислов щелочных металлов, которые имеют температуру испарения 800–1000 °С и вызывают образование прочных отложений на элементах топочных камер котлов, в исследованной золе составило Na₂O + K₂O = 9,77 %, что более чем в 3 раза превышает предельные значения. Полученные результаты позволяют прогнозировать высокие загрязняющие свойства очаговых остатков, которые будут образовываться при сжигании борщевика Сосновского. Необходима разработка мероприятий, снижающих образование отложений на конвективных поверхностях нагрева.

При сжигании сухих растительных отходов возникают затруднения, они имеют интенсивный вынос из топки легких горящих частиц. Главная задача состоит в удержании мелких частиц. Наиболее эффективно данную задачу решают циклонные и вихревые топki. Для снижения шлакования котлоагрегатов и увеличения времени между периодами их чистки самое лучшее применение показали низкотемпературные вихревые топki.

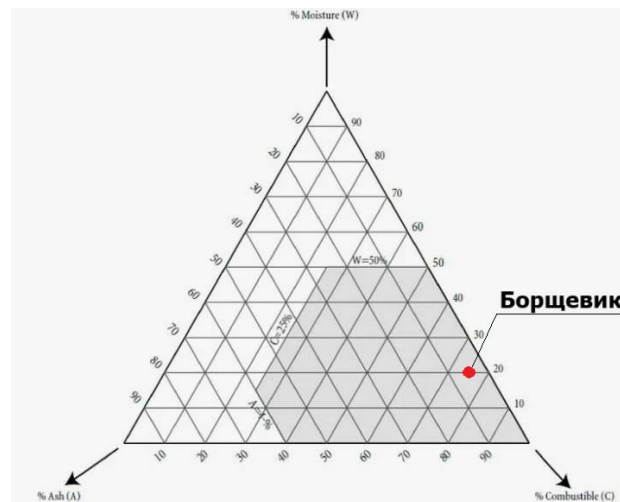


Рис. 1. Треугольник Таннера

Повышение энергетических свойств биомассы борщевика Сосновского можно получить за счет его гранулирования. В данном случае наиболее целесообразно его сжигание в котлоагрегатах со стационарным и циркулирующим кипящим слоем [4] или котлоагрегатах, оборудованных адиабатическими топками с наклонно-переталкивающими решетками.

Еще одним путем энергетического использования борщевика Сосновского является его сжигание в смеси с топливной щепой или кородревесным топливом. Однако оптимальное соотношение между компонентами данных топливных смесей должно быть определено в процессе промышленно-эксплуатационных испытаний.

Литература

1. Любов, В. К. Оценка энергетического и экологического потенциала использования щепы тополя и ольхи серой / В. К. Любов, А. Н. Попов, П. Д. Алексеев // Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 4 (421). – С. 54–67.
2. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/j/JANKOVSKY/education/Нормы.pdf>.
3. Щуренко, В. П. Разработка вихревых низкотемпературных топок и технологических схем огневой утилизации растительных отходов : дис. ... кан. техн. наук : 01.04.14 / Щуренко Валерий Петрович ; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Бийск, 2004. – 147 с.
4. Головков, С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, И. Ф. Коперин, В. И. Найденов. – М. : Лесная пром-сть, 1987. – 224 с.

РЕАЛИЗАЦИЯ ОДНОСТОРОННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

М. С. Манюкевич

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

Научные руководители: С. Г. Жуковец, Т. В. Алферова

Рассмотрен метод одностороннего определения мест повреждения воздушных линий электропередач с использованием процедуры восстановления напряжения при повреждениях измерительных цепей. Предложенный подход основан на анализе параметров аварийного режима и времени распространения бегущей волны, а также на восстановлении осцилло-

грамм напряжения на примере линии Гомель 330. Отмечено, что метод включает этапы первичной обработки данных, вычисления составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей, а также расчет восстановленных фазных напряжений и токов.

Ключевые слова: определение мест повреждения, воздушные линии электропередач, восстановление напряжения, симметричные составляющие, аварийный режим, односторонний метод, осциллограммы, электрические сети.

Для предприятий электрических сетей, которые эксплуатируют энергетические объекты, важной задачей является точное и быстрое определения мест повреждения (ОПМ) воздушных линий электропередач (ЛЭП). Основные методы ОМП основаны на оценке параметров аварийного режима, а также на времени распространения бегущей волны.

Как правило, основу построения алгоритмов одностороннего ОМП по параметрам аварийного режима составляет дистанционный принцип релейной защиты и автоматики ЛЭП, предполагающий наличие зарегистрированных токов и напряжений. Однако в условиях повреждения измерительных цепей напряжения или существенных искажений осциллограмм напряжения дистанционный принцип осциллограмм не может быть применен, поэтому воспользуемся процедурой восстановления напряжения.

Рассмотрим процедуру восстановления напряжения на примере линии Гомель-330:

1. Первичная обработка данных. Находятся симметричные составляющие токов и определяются вспомогательные величины. Для перехода в симметричные составляющие и обратно используются модальная матрица и обратная ей. Далее определяются токи и сопротивления, а также модули суммарного тока нагрузки между двумя электродвижущимися силами (ЭДС) с учетом обходной связи и падения напряжения на участке между ЭДС двух систем.

После производится расчет углов, и далее определяется вектор падения напряжения между двумя ЭДС.

2. Вычисление составляющих прямой последовательности. Находятся вспомогательные величины и после этого – доаварийное значение напряжения в месте замера токов и рассчитывается оценочная величина тока прямой последовательности в линии и шунте.

3. Определение составляющих обратной и нулевой последовательности. В послеаварийном режиме определяются симметричные составляющие токов в линии и шунте. В доаварийном режиме величины симметричных составляющих принимаем равными 0 в силу симметрии.

4. Расчет значений восстановленных напряжений. Определяются падения напряжения в сопротивлении системы, чисто аварийные токи линии и шунта. Рассчитываются чисто аварийные напряжения в месте установки терминала ОМП, после находим фазные напряжения и токи.

Таким образом, все полученные расчетные значения токов и восстановленных напряжений, определенные только по величинам модулей токов и разностям фазовых углов между токами, совпадают с исходными значениями

Перспективы применения метода. Можем сделать вывод о том, что для данного метода требуется разработка специальных методов восстановления осциллограмм напряжения для обеспечения функционирования устройств ОПМ и релейной защиты при повреждениях в измерительных цепях защиты.

С использованием расчетного примера подтверждена возможность восстановления составляющих напряжений аварийного и доаварийного режимов по параметрам зафиксированных токов воздушной ЛЭП для реализации одностороннего ОМП.

Данный метод одностороннего ОМП ЛЭП с учетом восстановления измерений напряжения перспективен для внедрения в устройства ОМП, регистраторы аварийных событий и терминалы релейной защиты в виде специального программного обеспечения.

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКЛАСТЕРНЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВТОМАТИЗАЦИИ В СЕТЯХ 6–10 кВ

А. В. Михадюк

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

Научный руководитель П. В. Лычев

Предложено при проведении мероприятий по автоматизации сети 10 кВ, применение автокластерных распределительных сетей 10 кВ вместо классического исполнения магистрального распределения электроэнергии.

Ключевые слова: автоматизация распределительной сети; автокластерные сети 6–10 кВ.

Согласно Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей до 2030 года, утвержденной Министерством энергетики Республики Беларусь 25 февраля 2020 г. № 7, отмечена необходимость развития и модернизации распределительных электрических сетей и их технического перевооружения, которые должны осуществляться на современных принципах и современной элементной базе. Причиной данных изменений в энергосистеме Республики Беларусь является постепенный естественный физический износ оборудования, конструкций и материалов, распределительных сетей 6–10 кВ, что приводит к снижению надежности электроснабжения, а увеличение подключенных к сети нагрузок – к снижению качества электроэнергии и повышению потерь электроэнергии.

Основная проблема – высокое число аварий воздушных линий (ВЛ) и длительное время восстановления электроснабжения поврежденных участков, что приводит к незапланированным убыткам электроэнергетической отрасли. Именно внедрение автоматизированного оборудования и цифровизация системы решает проблему бесперебойности функционирования сети.

Согласно анализу причин аварийности электрических сетей 6–10 кВ на 2024 г., перерывы в электроснабжении на данном классе напряжения происходят в 3 раза чаще чем для сетей 35–110 кВ. Среди основных причин повреждаемости ВЛ можно выделить: повреждение или обрыв провода, повреждение изоляторов, попадание посторонних объектов на линию, природные явления. Большая часть повреждений в сети 6–10 кВ являются неустойчивыми, т. е. самоликвидирующимися, но устройства автоматического повторного включения (АПВ) установлены не на всех фидерах ввиду устаревшего оборудования. Из-за чего при срабатывании максимальной токовой защиты линия отключается на значительное время – осмотр, устранение повреждения оперативно-выездной бригадой, что приводит к ограничению времени электроснабжения потребителя в среднем на более чем 1 ч.

Ключевой технологией решения вышеперечисленных проблем становится создание активно-адаптивной (автокластерной) сети. Она предполагает решение нескольких проектных аспектов:

1. Усовершенствование существующей или создание новой топологии сети.
2. Модернизация центров питания распределительной сети.
3. Автоматизация отключения минимально возможного поврежденного участка.

Традиционная структура преимущественно воздушной распределительной сети включает подстанции 110/35/10 кВ и 35/10 кВ, выполняющие как функцию трансформации напряжения, так и функцию распределения электроэнергии, а также набор отходящих фидеров 10 кВ. При этом отходящие фидеры в большинстве случаев либо являются радиальными и соответственно, не имеют возможности резервирования от другого источника, либо имеют возможность неавтоматического резервирования.

Такая структура сети имеет следующие недостатки:

– сложность обеспечения высокого уровня надежности (ввиду того, что при любом повреждении производится отключение всех потребителей фидера 10 кВ); высокая стоимость подстанций;

– избыточность сети на участках территории, примыкающих к подстанциям (соответственно – повышенная аварийность и избыточная себестоимость сети).

Эти недостатки могут быть в значительной степени решены преобразованием традиционной сети в автокластерную сеть, включающем в общем случае следующие действия:

– замена подстанций 35/10 кВ точками трансформации, выполняющими только функцию трансформации напряжения без решения задачи распределения электроэнергии (рис. 1);

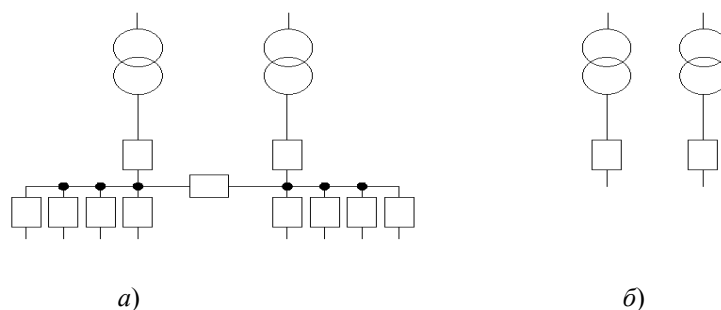


Рис. 1. Схемы классической подстанции с функцией распределения (а), цифровой точки трансформации без функции распределения (б)

– исключение избыточных (не используемых для питания потребителей) участков сети у подстанций.

– преобразование радиальных фидеров в кольцевые;

– разбиение сети на кластеры связанных по сети Фидеров

– разбиение каждого кластера на секции, расположенные между автоматическими коммутационными аппаратами, обеспечивающими в случае повреждения питания потребителей всех секций кластера, кроме поврежденной;

– разбиение каждой секции на линии, расположенные между неавтоматическими коммутационными аппаратами, обеспечивающими в случае повреждения питания потребителей всех линий секции, кроме поврежденной (рис. 2).

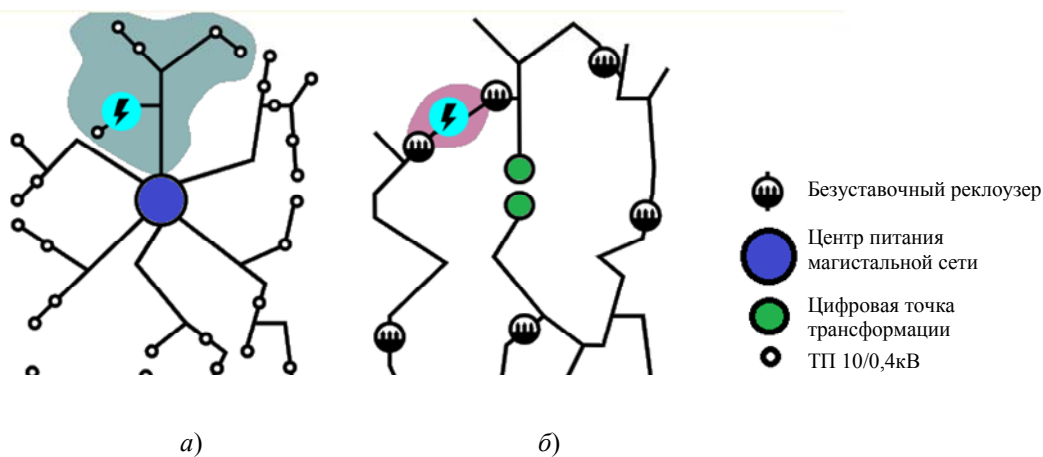


Рис. 2. Схемы классической модели магистральной сети (а) и автокластерной распределительной сети с применением безуставочных коммутационных аппаратов (б)

Сравнительное моделирование показателей надежности и электрических параметров для автокластерной и традиционной сети показывает, что автокластерная сеть при прочих равных условиях обеспечивает снижение SAIDI в три раза и снижение трудоемкости ликвидации аварий на 20–40 %, снижение нагрузочных потерь электроэнергии – на 20–40 %.

Снижение SAIDI в автокластерной сети вытекает из топологической возможности обеспечения резервного питания для каждого участка сети, кроме поврежденного, – свойства, недоступного для радиальной сети

Снижение трудоемкости ликвидации аварий вытекает из возможности более быстрой локализации места повреждения, всегда наблюдаемого парой автоматических делительных коммутационных аппаратов. Снижение нагрузочных потерь кажется удивительным, так как при переходе к автокластерной сети уменьшается количество фидеров и, как следствие, должны расти потери электроэнергии на головных участках сети. Однако существует и другое обстоятельство, способствующее снижению потерь электроэнергии и возможности установить точки нормального разрыва в оптимальных местах. И это обстоятельство в большинстве случаев оказывается более значимым.

Преимущества кольцевых фидеров, обеспечивающих автоматическое резервирование, по сравнению с радиальными фидерами были осознаны много десятилетий назад. Для реализации этих преимуществ используются системы РЗА, включающие, как правило, направленную максимально-токовую защиту, защиту минимального напряжения и сетевой автоматический ввод резерва.

Данный опыт в создании автокластерной сети уже можно позаимствовать в ПАО «Россети», а именно, в качестве пилотной зоны для апробирования указанных выше технологий была выбрана часть Сахского РЭС, имеющая 6788 потребителей, 4 подстанции 35/10 кВ, 14 фидеров 10 кВ, 170 трансформаторных подстанций, длину воздушных линий 10 кВ – 141 км, средний срок службы подстанций – 40 лет.

В результате выполненных преобразований с использованием указанных технологий удалось получить следующие результаты (см. таблицу).

Результаты построения автокластерной сети

Параметр	Было	Стало
Количество фидеров 10 кВ, шт.	14	9
Длина ВЛ 10 кВ, км	141	139
SAIDI, час-год	16,18	1,96
Время ликвидации аварий, час-год	257	162
Нагрузочные потери, кВт	48	23
Доступность трансформаторной мощности, %	34	100
Доступность по качеству электроэнергии, %	68	100
Средний срок службы коммутационного аппарата 10–35 кВ, лет	40	7

В результате построения автокластерной сети удалось решить следующие проблемы в Сахском РЭС :

- обеспечить доступность трансформаторной мощности для всех потребителей;
- обеспечить нормативное качество электроэнергии для всех потребителей;
- снизить показатель SAIDI более, чем в 8 раз;
- снизить нагрузочные потери на 52 %;
- снизить общие показатели времени ликвидации аварий на 37 %.

По экономическим расчетам решение первых трех проблем с использованием традиционных технологий обошлось бы оценочно вдвое дороже. При этом существенного улучшения показателей надежности и снижения нагрузочных потерь не произошло бы.

Таким образом, результаты реализации данного проекта указывают на целесообразность его развития и реализации на платформах уже существующих РЭС.

ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА В ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ

Д. А. Капуза

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

Научный руководитель О. Г. Широков

Проведены опыты по выявлению пусковых характеристик тока и напряжения при разных способах включения персонального компьютера в питающую сеть, так как в сети Интернет такой информации не было найдено.

Ключевые слова: персональный компьютер, пусковые характеристики, ток, напряжение.

Для проведения опыта была собрана схема, представленная на рис. 1, где QF – автоматический выключатель, $S1$ – вилка вставляемая в розетку; $ТТ$ – трансформатор тока; $ИПТ$ – измерительный преобразователь тока; $ИПН$ – измерительный преобразователь напряжения; $БП$ – блок питания персонального компьютера (ПК) мощностью 450 Вт; $МП$ – материнская плата персонального компьютера; $SB1$ – кнопка включения персонального компьютера (расположенная на корпусе ПК); $КРПЭС$ – комплекс регистрации параметров электрических сигналов, состоящий из устройства согласования сигналов, АЦП, ноутбука со специальным ПО.

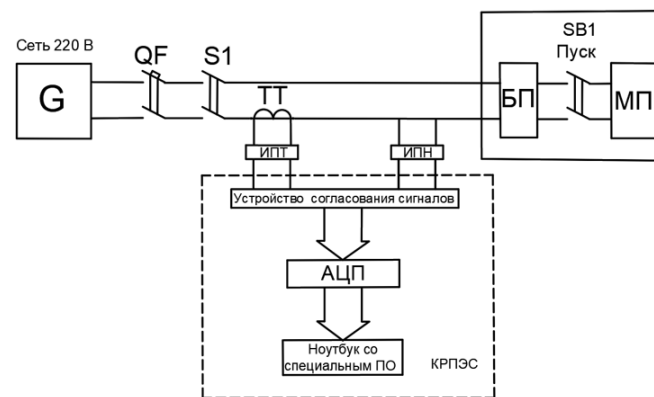


Рис. 1. Схема исследования пусковых характеристик тока и напряжения персонального компьютера

В результате регистрации событий с помощью АЦП были получены следующие осциллограммы тока и напряжения в разных режимах пуска персонального компьютера (рис. 2, 3).

На рис. 2 показана осциллограмма, на которой приведен плавный пуск персонального компьютера из режима ожидания. В начале осциллограммы виден тот самый режим ожидания, в котором находится блок питания персонального компьютера. Затем мы нажали кнопку «ПУСК» и наблюдаем довольно плавное увеличение тока, которое стабилизируется после полного запуска персонального компьютера. Напряжение, в свою очередь, на протяжении всего опыта оставалось неизменным.

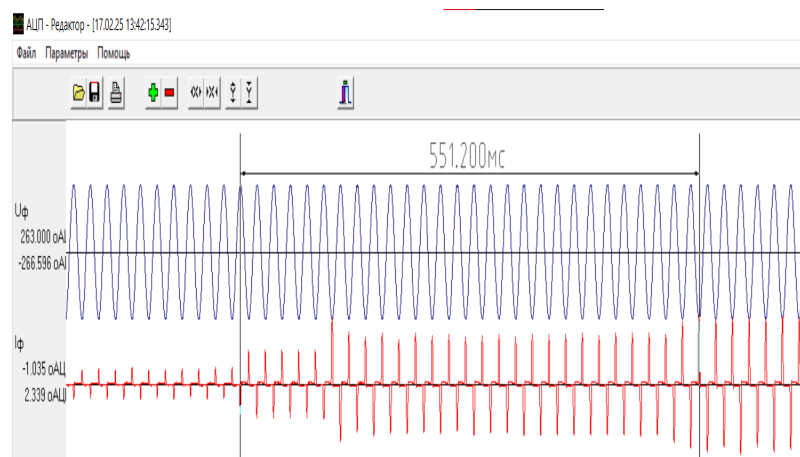


Рис. 2. Осциллограмма тока и напряжения при включение ПК в повседневном режиме (нажатием одной кнопки SB1 «ПУСК»)

На рис. 3 показана осциллограмма, по которой четко виден момент включения вилки в розетку, сопровождающийся значительным броском тока и незначительным провалом напряжения. Спустя 47,5 мс ток и напряжение полностью стабилизировались.

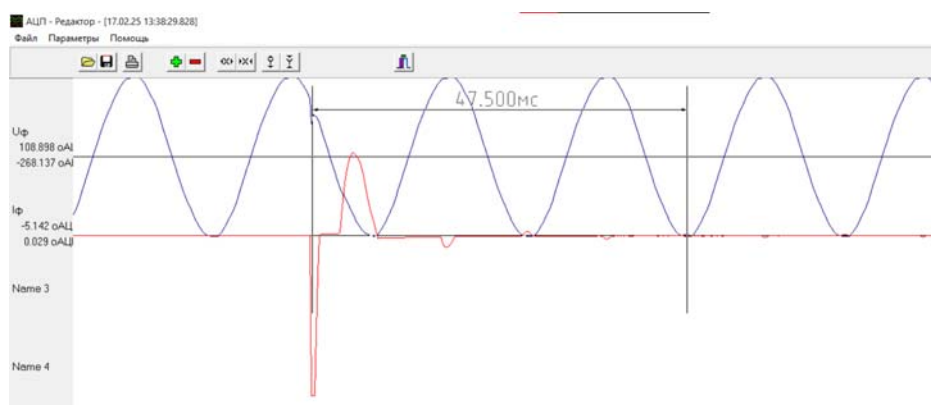


Рис. 3. Осциллограмма напряжения и тока при пуске ПК через включение вилки в розетку и моментального нажатия кнопки.

Для рис. 2 и 3 рассчитаем кратность коммутационного импульса и кратность пускового тока:

$$K_{к.и} = \frac{I_{\max}}{I_{уст}}; \quad (1)$$

$$K_{п.т} = \frac{I_{пуск}}{I_{уст}}, \quad (2)$$

где $K_{к.и}$ – кратность коммутационного импульса при включении вилки в розетку; I_{\max} – максимальное значение тока в момент коммутации; $I_{уст}$ – установившийся ток после запуска ПК; $K_{п.т}$ – кратность пускового тока; $I_{пуск}$ – пусковой ток.

Амплитудные значения тока и напряжения оценивались в отсчетах АЦП (оАЦП) во избежание необходимости калибровки измерительной цепи, поскольку кратности пускового импульса и пускового тока – относительные величины (см. таблицу).

Результаты расчетов кратности пускового импульса и пускового тока

Номер опыта	I_{\max} , оАЦП	$I_{пуск}$, оАЦП	$I_{уст}$, оАЦП	$K_{к.и}$	$K_{п.т}$
1	2,427	1,143	2,393	1,01	0,477
2	5,142	2,603	0,029	177,24	89,75

По полученным осциллограммам и расчетам наглядно видно, что при включении персонального компьютера из режима ожидания (одним нажатием кнопки «ПУСК») запуск проходит плавно и без резкого скачка тока, что продлит его срок службы.

При включении персонального компьютера через включение вилки в розетку запуск проходит в два этапа:

- 1 этап – сопровождается коммутационным импульсом тока с большой кратностью;
- 2 этап – увеличенный пусковой ток по сравнению с включением ПК из режима ожидания.

Чтобы избежать коммутационных импульсов тока, рекомендуется использовать сетевые фильтры с выключателями для питания персонального компьютера. Включение персонального компьютера из режима ожидания лучше, так как пусковой ток значительно ниже и это сказывается на сроке безаварийной эксплуатации в сторону его увеличения.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА БУТИЛИРОВАННОЙ ВОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Е. А. Шамберова

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Выполнен анализ качества исследуемых марок бутилированной воды согласно заявленной производителем информации. Экспериментальным путем определены основные показатели качества анализируемых проб воды.

Ключевые слова: питьевая вода, методы обеззараживания, качество.

Вода занимает второе место после кислорода в жизни человека. Вопрос качества питьевой воды не утратил своей актуальности в наше время. Для нормального функционирования организма нужна вода, которая по качественному составу будет отвечать всем требованиям. Многие люди предпочитают покупать бутилированную воду, так как она мягче водопроводной, очищена от вредных примесей и имеет сбалансированный состав микроэлементов.

Целью данной работы является анализ состава бутилированной питьевой воды различных производителей, наиболее распространенных на территории Беларуси, по информации данной на этикетках продуктов и опытным методом с помощью водно-химической экспресс-лаборатории (ВХЭЛ).

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Произвести анализ качества исследуемых марок бутилированной воды согласно заявленной производителями информации.
2. Экспериментальным путем определить основные показатели качества анализируемых проб воды.
3. Произвести оценку санитарно-гигиенических свойств исследуемых марок воды и сравнить с нормативными значениями

В качестве объекта исследования использовалось пять марок бутилированной воды: «MINSK WATER», «СВЯТОЙ ИСТОЧНИК», «DARIDA AQUA», «BONA AQUA», «YOUR WATER» (рис. 1).



Рис. 1. Объекты исследования

По информации производителей «MINSK WATER» используют два метода обеззараживания – ультрафиолетовое облучение и озонирование. Образец «СВЯТОЙ ИСТОЧНИК» обработан с применением фильтрации, обратного осмоса, озона, УФ-облучения. Образец «BON AQUA» обработан с помощью фильтрации, деионизации с применением катионного обмена и обратного осмоса, кондиционирования, озонирования и УФ-облучения. В образцах «DARIDA AQUA» и «YOUR WATER» способы обработки не указаны.

Оценку санитарно-гигиенических свойств проводили по следующим показателям (рис. 2–7):

- железа общего – визуально-колориметрическим методом, основанным на образовании окрашенного в желто-оранжевый цвет комплексного соединения железа с сульфосалициловой кислотой, с предварительным окислением присутствующего в воде двухвалентного железа до трехвалентного персульфатом натрия;

- общей щелочности – титровании растворенных в воде соединений кислотой в присутствии кислотно-щелочных индикаторов, меняющих свою окраску в зависимости от pH среды;

- общей жесткости – титрованием трилоном 6.....;

- содержание хлоридов – титриметрическим методом, основанным на реакции хлорид-анионов с нитратом серебра, в результате которой образуется суспензия практически нерастворимого хлорида серебра.

- водородный показатель – визуально-колориметрическим методом с помощью индикаторной бумаги и раствором индикаторов;

- солесодержание – с помощью кондуктомера.

Для оценки полученных результатов использовался нормативный документ СанПиН 10-124 РБ 99.

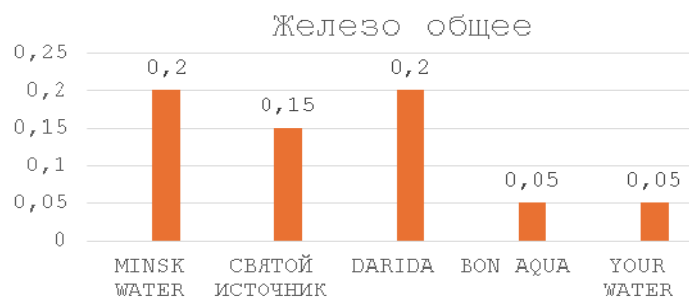


Рис. 2. График содержания железа общего в представленных образцах

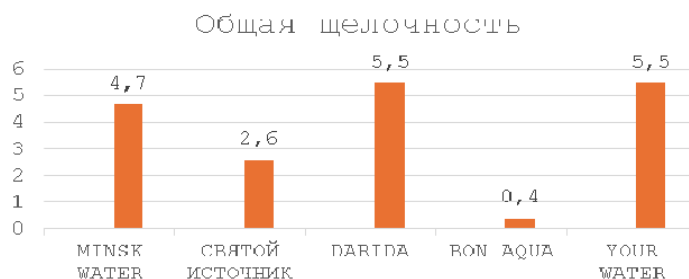


Рис. 3. График общей щелочности в представленных образцах

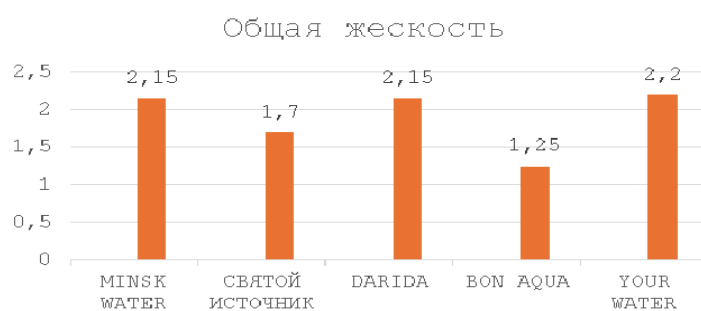


Рис. 4. График общей жесткости в представленных образцах

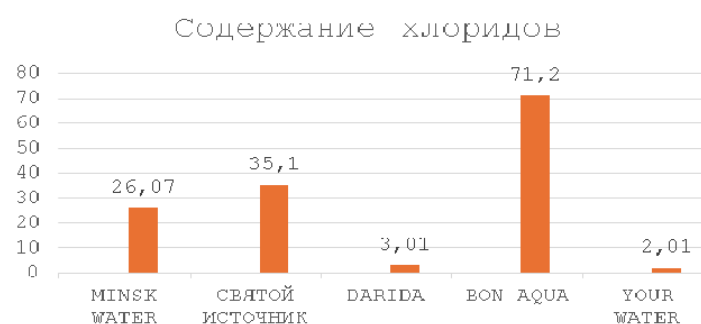


Рис. 5. График содержания хлоридов в представленных образцах

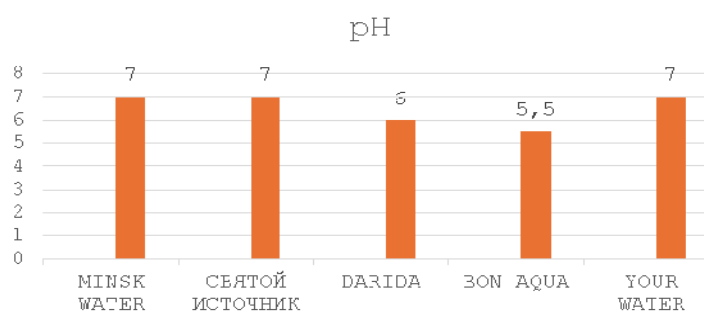


Рис. 6. График водородного показателя в представленных образцах

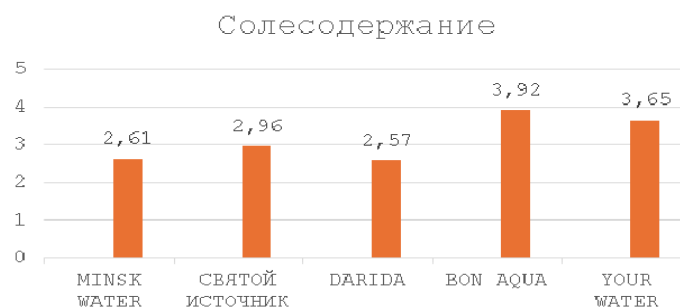


Рис. 7. График солесодержания в представленных образцах

Результаты исследования представлены в таблице.

Санитарно-гигиенические свойства исследуемых марок воды

Наименование показателей	Единицы измерения	Нормы СанПин РБ	MINSK WATER		СВЯТОЙ ИСТОЧНИК		DARIDA AQUA		BON AQUA		YOUR WATER	
			Заявленное	Опытное	Заявленное	Опытное	Заявленное	Опытное	Заявленное	Опытное	Заявленное	Опытное
Железо общее	мг/л	0,3	–	0,2	–	0,15	–	0,2	–	0,05	–	0,05
Общая щелочность	мг-экв/л	0,5–6,5	–	4,7	–	2,6	–	5,5	–	0,4	–	5,5
Общая жесткость	мг-экв/л	1,5–7,0	Не более 7,0	2,15	2,0	1,7	Не более 6,0	2,15	1,5–4	1,25	Не более 6,0	2,2
Содержание хлоридов	мг/л	350	18–40	29,07	0,5–200	35,1	0–30	3,01	60–130	71,2	0–30	2,01
Водородный показатель (pH)	Единицы pH	В пределах 6–9	7,7–8,0	7,0	7,0	7,0	7,5	6,0	6,9	5,5–6,0	7,5	7,0
Солесодержание	мг/г	Не более 1000	–	2,61	–	2,96	–	2,57	–	3,92	–	3,65

В результате проведенного анализа установлено, что все виды образцов находятся в допустимых значениях. Отмечается большой разброс по общей жесткости. Наименьшее значение отмечается в образце «BON AQUA». Наибольшая общая жесткость наблюдается в образце «YOUR WATER». В образцах «DARIDA AQUA» и «BON AQUA» заявленный показатель pH незначительно отличается от опытного. Наиболее лучшими по качеству себя показали образцы «СВЯТОЙ ИСТОЧНИК» и «BON AQUA», однако pH воды «BON AQUA» соответствует слабокислой среде.

Литература

1. Найда, Е. П. Сравнительный анализ бутилированной питьевой воды для детского питания разных торговых марок / Е. П. Найда, Е. В. Синкевич. – 2021. – 262 с.
2. Котович, А. И. Оценка показателей качества водопроводных вод городов Республики Беларусь / А. И. Котович, Т. А. Гапонова, В. В. Садовский. – 2022.

СЕКЦИЯ IV РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И СВЯЗЬ

МЕДИЦИНСКИЕ ДАТЧИКИ В УМНЫХ ОЧКАХ ДЛЯ СЛАБОСЛЫШАЩИХ И ГЛУХИХ ЛЮДЕЙ

А. В. Кузнецова, И. Э. Петров

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Тамбовский государственный
технический университет», Российская Федерация*

Научный руководитель Т. А. Фролова

Проведен обзор существующих устройств для слабослышащих и глухих людей. Изучен принцип работы умных очков для людей с потерей слуха. Предложены медицинские датчики, которые можно внедрить в умные очки.

Ключевые слова: умные очки, медицинские датчики, радиоэлектроника, слуховой аппарат.

Слабослышащие и глухие люди ежедневно сталкиваются с трудностями при общении с окружающими. Несмотря на то, что язык жестов стал для них спасением, он не является универсальным решением, поскольку не все готовы изучать этот новый язык. На помощь приходят умные очки, транслирующие текст на линзы [1]. За последние пять лет было выпущено группами исследователей около десяти прототипов умных очков и реальных устройств. В данной работе будут рассмотрены принцип работы некоторых из них, строение уже существующих приборов, их недостатки, предложены медицинские датчики, которые значительно упростят жизнь слабослышащим и глухим людям.

В устройстве от Google 2020 г. выпуска проектор для вывода текста прямо на линзы встроен в правую дужку очков, в которой также располагаются плата управления и первый аккумулятор. В левой дужке располагается второй аккумулятор. Для работы очков необходимо соединение с Bluetooth через смартфон, который используется как микрофон для восприятия звуков. Серьезный недостаток такого устройства – максимальное время работы составляет 2 часа. Через два года проект был перезапущен, чтобы переделать устройство с учетом дополненной реальности (отказаться от необходимости в смартфоне) и добавить в него переводчик на другие языки, однако оно по-прежнему находится на стадии прототипа.

В 2022 г. китайская компания XREAL выпустила умные очки, которые могут отображать важные звуковые сигналы в виде визуальных уведомлений, например, в экстренных ситуациях. Устройство также нуждается в синхронизации с приложением в смартфоне и Bluetooth-соединении.

Очки от AirCaps, выпущенные в 2024 г., требуют беспроводное подключение к программе в сопровождающем гаджете, покупку самого прибора, подписку за неограниченное количество часов распознавания речи и за приобретение линз с диоптриями. Устройство может автоматически настраиваться в зависимости от уровня фонового шума, чтобы обеспечить наилучшее качество звука для пользователя.

Аппарат от Hearview 2024 г. выпуска представляет собой очки с дополненной реальностью и встроенным искусственным интеллектом, способным улучшать обработку речи со временем и адаптироваться к различным акцентам, темпам речи и тонам. В умные очки встроена система оповещения о потенциальных опасностях, а время работы составляет до 7 часов.

Устройство от INMO того же года сходно с предыдущим, однако дополнительно оснащено дисплеем, не пропускающим до 85 % света, ИИ-помощником ChatGPT, фотокамерой, переводчиком, навигатором, программами для ознакомления с видео и фотоконтентом [2].

Недостаток вышеописанных разработок заключается в высокой стоимости и в отсутствии аналога для русскоязычного потребителя. Также стоит отметить, что на данный момент не существует умных очков со встроенными медицинскими датчиками. Предлагается интегрировать в очки для глухих и слабослышащих людей датчики движения глаз, сердечного ритма, оксигенации крови, для мониторинга сна, термодатчики.

Датчики движения глаз могут отслеживать движение глаз и использоваться для управления устройствами или интерфейсами. Они могут определять, куда смотрит человек, и анализировать его зрительное внимание. В контексте умных очков для слабослышащих и глухих людей такие датчики могут использоваться для улучшения взаимодействия, определения уровня усталости. Они позволяют адаптировать интерфейсы под зрительные предпочтения пользователя. Если глаза устали или находятся в состоянии стресса, устройство может предложить перерыв или другого рода поддержку.

Датчики сердечного ритма встраиваются в дужки очков и позволяют отслеживать пульс пользователя. В их функции входит мониторинг стрессовых состояний, контроль за качеством сна. Увеличение сердечного ритма может сигнализировать о стрессе или эмоциональном напряжении [3–5]. Сердечный ритм может быть проанализирован во время сна для определения его качества и стадии.

Датчики оксигенации крови могут измерять уровень кислорода в крови, помогают в следующих аспектах: мониторинг здоровья во время сна. Низкий уровень кислорода может указывать на проблемы с дыханием или другие проблемы со здоровьем. Во время сна уровень кислорода может колебаться, и отслеживание этих изменений может помочь оценить его качество.

Термодатчики в умных очках могут использоваться для измерения температуры кожи или окружающей среды, применяются для мониторинга состояния здоровья, увеличения комфорта. Высокая температура может сигнализировать о болезни или стрессовом состоянии. Автоматическая регулировка функций устройства в зависимости от температуры повысит комфорт пользователя.

Комбинирование всех описанных датчиков позволяет создать комплексный подход к мониторингу сна. Анализируя данные о движении глаз, сердечном ритме и оксигенации, можно получить полную картину качества сна пользователя. Устройства могут давать рекомендации по улучшению сна на основе полученной информации.

Все эти датчики могут быть синхронизированы со смартфоном или другими устройствами для сбора и анализа медицинских данных. Это может быть очень полезно для слабослышащих и глухих людей, позволяя им лучше следить за своим здоровьем [6].

В настоящее время ведутся работы по созданию макета первого прототипа умных очков со встроенными в них медицинскими датчиками.

Литература

1. The Use of Smart Glasses for Lecture Comprehension by Deaf and Hard of Hearing Students / A. Miller, J. Malasig, B. Castro [et al.] // ResearchGate. – 2017. – 7 p.
2. Development Of Augmented Reality Based Smart Glasses for Assistance of Deaf People / S. S. Ramachandran, U. Karni, A. K. Veeraraghavan [et al.] // ResearchGate. – 2018. – 7 p.
3. CFD and MRI studies of hemodynamic changes after flow diverter implantation in a patient-specific model of the cerebral artery / S. V. Frolov, S. V. Sindeev, J. S. Kirschke [et al.] // Experiments in Fluids. – 2018. – Vol. 59 (11), N 176. EID: 2-s2.0-85056405197. – WOS 000449080600001. – DOI 10.1007/s00348-018-2635-8 (Q1)
4. Phase-contrast MRI versus numerical simulation to quantify hemodynamical changes in cerebral aneurysms after flow diverter treatment / S. Sindeev, P. G. Arnold, S. Frolov [et al.] // PLoS ONE. – 2018. – Vol. 13 (1), N e0190696. – EID: 2-s2.0-85040035862. – WOS 000419403800101. – DOI 10.1371/journal.pone.0190696 (Q1)
5. Avsievich, T. I. Interrelation between respiratory and contractile activity of Physarum polycephalum / T. I. Avsievich, S. V. Frolov, S. G. Proskurin // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Vol. 50 (22), N 224003. – EID: 2-s2.0-85019460694. – WOS 000401483600001. – DOI 10.1088/1361-6463/aa6ce5 (Q1)
6. Kim, D. Applications of Smart Glasses in Applied Sciences: A Systematic Review / D. Kim, Y. Choi // Applied Sciences. – 2021. – № 11. – 7 p.

ВЫБОР ОФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕЛЕВОЙ ЛАМПЫ

Е. П. Евстигнеева, М. А. Любавина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Российская Федерация

Научный руководитель Т. А. Фролова

Стандарты оснащения медицинских учреждений разработаны для обеспечения безопасности пациентов и медицинского персонала. Правильный выбор медицинского оборудования базируется не только на удобстве эксплуатации, но и на соблюдении требований законодательства.

Ключевые слова: диагностика, медицинские технологии, офтальмология, щелевая лампа, стандарт.

Стандарты оснащения медицинских учреждений разрабатываются с целью обеспечения безопасности пациентов и персонала, улучшения качества оказываемых медицинских услуг, минимизации рисков ошибок, а также для оптимизации работы медицинских учреждений. Выбор медицинского оборудования в соответствии с этими стандартами является критически важным этапом при оборудовании лечебных заведений [1–8]. Грамотный процесс подбора включает несколько последовательных шагов, составляющих методологию выбора оборудования в соответствии со стандартами оснащения. В данном исследовании освещаются отдельные аспекты этой методики, в частности, процедура проверки соответствия медицинского изделия требуемым стандартам по коду вида. Если в стандарте указан код вида номенклатуры медицинских изделий, то подбор производится исключительно среди тех вариантов, которые этому коду соответствуют.

Актуальной задачей является оснащения офтальмологического кабинета, которое идет по приказу РФ от 9 июня 2020 г. № 558н «О внесении изменений в порядок оказания медицинской помощи населению при заболеваниях глаза, его придаточного

аппарата и орбиты» (рис. 1). В нем указываются конкретные виды оборудования и их необходимое количество, которые должны быть в наличии для успешного прохождения процедуры лицензирования.

№ п/п	Код вида номенклатурной классификации медицинских изделий	Наименование вида медицинского изделия в соответствии с номенклатурной классификацией медицинских изделий	Наименование оснащения (оборудования)	Количество, шт.
1 ²	206320	Набор пробных очковых линз	Набор пробных линз с пробными оправами и принадлежностями	1
	206290	Оправа для пробных очковых линз		1
	206310	Линза очковая пробная		1
2	118500	Проектор для проверки остроты зрения	Автоматический проектор знаков с принадлежностями	1
3	118390	Таблица для проверки остроты зрения электронная	Таблица для исследования остроты зрения вблизи	1
4	336080	Рефрактокератометр, автоматический	Автоматический кераторефрактометр	1
5	105070	Лампа щелевая офтальмологическая, смотровая	Щелевая лампа стационарная с принадлежностями	1

Рис 1. Фрагмент стандарта оснащения кабинета офтальмологии

Было выявлено, что одним из основных приборов является щелевая лампа (рис. 2). Это устройство, которое объединяет в себе функции микроскопа и источника направленного света. Она позволяет детально изучать структуры глаза как переднего отдела, так и заднего сегмента, в частности, сетчатки и стекловидного тела.



Рис. 2. Щелевая лампа

Рынок производства и поставок щелевых ламп представлен рядом популярных производителей, среди которых выделяются компании «Dixion», «АО ЗОМЗ» и «Зенит» (российские бренды), а также зарубежные фирмы, такие как «Huvitz» (Южная Корея) и «Shin Nippon» (Япония). Организации производят различные модели щелевых ламп, каждая из которых обладает множеством технических характеристик.

Основными характеристиками при выборе такой лампы являются следующие параметры: увеличение окуляров, межзрачковое расстояние, увеличение бинокля и их поля зрения, диоптрийная регулировка окуляров, регулировки ширины и длины щели, встроенные фильтры и диапазоны продольного, бокового и продольного перемещений. Именно они дают общее представление заказчику об ее виде и возможностях.

Сам выбор оборудования ведется согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2024 г. № 1875 «О мерах по предоставлению национального режима при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, закупок товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц», который в свою очередь связан непосредственно с каталогом товаров, работ и услуг (КТРУ). На сайте zakupki.gov.ru в разделе «Каталог», далее «Медицинские изделия» и «Классификация», выбирается пункт «Номенклатурная классификация медицинских изделий по видам». Следом вводится код наименования изделия, который является уникальным для каждого вида техники (рис. 3).

Рис. 3. Фрагмент окна поиска медицинских изделий с возможностью ввода кода вида

Именно здесь представлены шаблоны на написание технического задания, которое изначально согласуется с заказчиком (рис. 4).

Таким образом, корректный подбор медицинского оборудования в строгом соответствии со стандартами оснащения имеет решающее значение для обеспечения высокого уровня медицинской помощи и безопасности пациентов.

Рис. 4. Фрагмент из КТРУ на щелевую лампу

При выборе оборудования важно учитывать не только потребности конкретного лечебного учреждения и его сотрудников, но и законодательные нормы, включая соответствие медицинским изделиям установленных кодов видов. Такой подход обеспечивает эффективное функционирование медицинского учреждения и повышает качество ухода за пациентами.

Л и т е р а т у р а

1. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35–45.
2. Фролова, М. С. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / М. С. Фролова, С. В. Фролов, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Спец. вып. 52. – С. 106–111.
3. Коновалова, К. Н. Перспективы использования достижений робототехники в офтальмологии / К. Н. Коновалова, Т. А. Фролова // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : тез. 3 Междунар. конф. с элементами науч. шк. – Тамбов, 2016. – С. 399–400.
4. Современные тенденции развития рынка медицинских информационных систем / С. В. Фролов, С. Н. Маковеев, С. В. Семенова, С. Г. Фареев // Вестник ТГТУ. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 266–272.
5. Фролова, М. С. Оптимальный выбор изделия медицинской техники с использованием информационных систем в здравоохранении / М. С. Фролова, С. В. Фролов // Вестник ТГТУ. – 2013. – Т. 19 (3). – С. 553–561.
6. Фролов, С. В. Объектно-ориентированная декомпозиция информационной модели изделий медицинской техники / С. В. Фролов, М. С. Фролова // Ползуновский альманах. – 2016. – № 2. – С. 112–117.
7. Фролов, С. В. Мировые проблемы при выборе медицинского изделия для учреждения здравоохранения / С. В. Фролов, М. С. Фролова // Менеджер здравоохранения. – 2013. – № 11. – С. 50–61.

ИННОВАЦИОННЫЙ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД

В. Е. Назарчук

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

Научный руководитель В. А. Савельев

Представлена разработка учебно-исследовательского стенда для моделирования систем промышленной автоматизации на базе программируемых логических контроллеров, преобразователей частоты, датчиков и IoT-платформы ESP32. Практическая значимость стенда заключается в создании образовательной среды, имитирующей реальные промышленные процессы, что способствует повышению компетенций будущих специалистов.

Ключевые слова: учебно-исследовательский стенд, система автоматизации, ПЛК, преобразователь частоты, IoT, электропривод, алгоритм управления.

С увеличением внедрения автоматизированных систем в промышленности растет потребность в подготовке специалистов, владеющих современными технологиями управления. Учебные стенды, моделирующие различные режимы работы автоматизированных систем, позволяют будущим специалистам лучше понять принципы управления и проводить исследования. В рамках интеграции промышленных технологий в образовательный процесс кафедра «Автоматизированный электропривод»

ГГТУ им. П. О. Сухого реализует проекты, включающие создание стендов на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК), программируемых терминалов (ПТ), датчиков и преобразователей частоты (ПЧ) [1–3]. Такой подход способствует разработке и тестированию новых алгоритмов управления, совершенствованию существующих решений и повышению конкурентоспособности выпускников на рынке труда.

Цель работы состоит в разработке учебно-исследовательского стенда для формирования у будущих специалистов практических навыков работы с современными системами автоматизации, углубленного изучения принципов управления электроприводами, а также создания платформы для проектирования, тестирования и оптимизации алгоритмов управления в условиях, максимально приближенных к реальным промышленным процессам.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- 1) проанализировать технические характеристики, возможности и способы реализации комплектующих;
- 2) разработать схему устройства;
- 3) собрать опытный образец стенда

На рис. 1 изображена функциональная схема предлагаемого устройства.

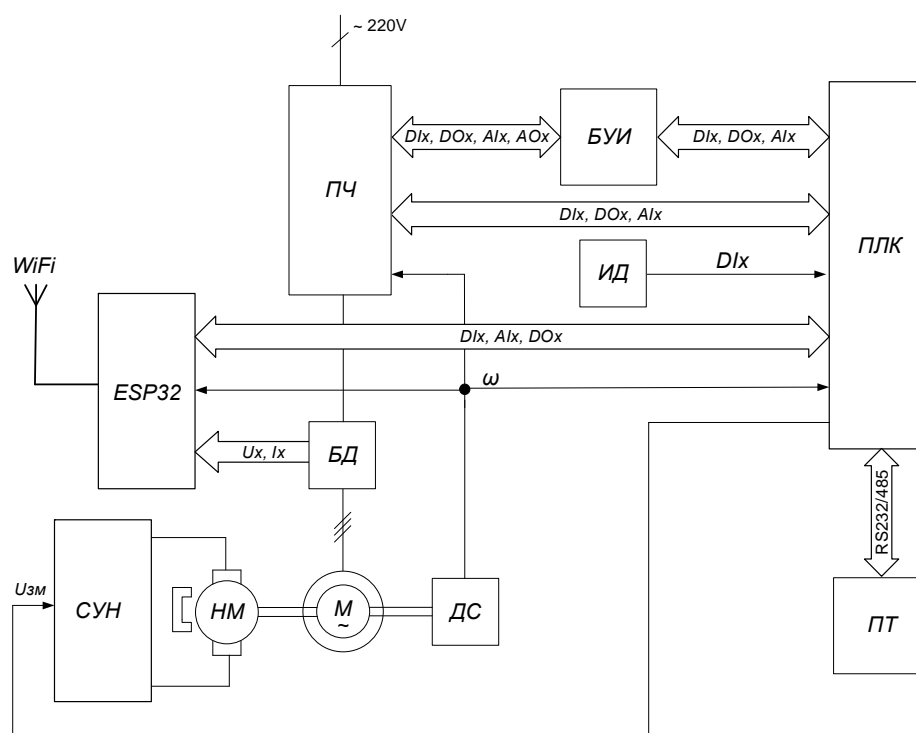


Рис. 1. Функциональная схема учебно-исследовательского стенда «Система автоматизации»

Программируемый логический контроллер осуществляет сбор и обработку сигналов от датчиков, реализует алгоритмы преобразования данных в управляющие команды для ПЧ и системы управления нагрузкой (СУН), а также обеспечивает координацию функциональных модулей системы в соответствии с заданными параметрами управления. Преобразователь частоты регулирует скорость асинхронного

двигателя (М) изменением частоты и напряжения статора, управляемый аналоговыми или цифровыми сигналами от ПЛК. Датчик скорости (ДС) передает данные о текущей скорости вала в ПЛК и ПЧ для реализации обратной связи. СУН с нагрузочной машиной (НМ) постоянного тока с постоянными магнитами, моделирует изменяемую нагрузку, регулирующую ПЛК, что позволяет проводить экспериментальные исследования различных режимов работы. Блок датчиков (БД) контролирует ключевые параметры станка, а программируемый терминал (ПТ) и блок управления и индикации (БУИ) обеспечивают визуализацию информации, ввод команд и локальное управление технологическим процессом. Плата ESP32 реализует концепцию «Интернета вещей» (IoT). Ее функции включают в себя удаленный мониторинг, дистанционное управление, интеграцию с IoT-системами и возможность подключения дополнительных датчиков для повышения функциональности.

Предложенный учебно-исследовательский стенд обеспечивает всестороннее изучение работы системы промышленной автоматизации, формируя у специалистов навыки разработки управляющих программ и решения задач по управлению механизмами. Интеграция промышленных компонентов (ПЛК, ПЧ, СУН) с микроконтроллером ESP32 позволяет реализовать удаленное взаимодействие со стендом посредством IoT-функционала. Практическая значимость стенда заключается в возможности исследования режимов движения, оптимизации управления электроприводами и подготовки специалистов, владеющих цифровыми технологиями управления. Перспективы развития связаны с разработкой новых, инновационных решений, отвечающих современным требованиям.

Л и т е р а т у р а

1. Тодарев, В. В. Нагрузочное устройство / В. В. Тодарев, В. А. Савельев, И. Н. Бураченко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. ст. 6 Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2 нояб. 2022 г. / Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – Гомель : Гомсельмаш, 2022. – С. 215–218.
2. Савельев, В. А. Испытательный стенд на основе асинхронной машины с разделенными обмотками статора / В. А. Савельев, В. В. Тодарев // Энергоэффективность. – 2022. – № 11. – С. 30–32.
3. Тодарев, В. В. Нагружающее устройство комплексных испытательных стендов / В. В. Тодарев, В. А. Савельев, И. В. Дорошенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – № 3. – С. 81–87.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕРНИЗАЦИИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

А. В. Савельева

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

Научный руководитель В. В. Брель

Изложена актуальность модернизации металлорежущих станков в условиях ограниченного бюджета и высокой стоимости нового оборудования, а также рассмотрен круг проблем, которые необходимо решить для успешного проведения модернизации.

Ключевые слова: металлорежущий станок, модернизация, износ, моральное старение.

Модернизация металлорежущих станков становится особенно актуальной в свете экономических условий, когда покупка нового оборудования требует значительных

финансовых вложений. Новые станки зачастую стоят значительно дороже и их приобретение может негативно сказаться на бюджете предприятия.

Кроме того, старые станки уже встроены в производственные схемы и процессы, что делает их замену более сложной и затратной. Полная замена оборудования требует дополнительных расходов на установку, наладку и обучение персонала, а также может привести к временным простоям в производстве.

Модернизация позволяет значительно улучшить характеристики существующих станков без необходимости полного их замещения. Это решение экономически целесообразно и позволяет сохранить уже налаженные производственные процессы.

Целями модернизации являются увеличение производительности, улучшение качества продукции и снижение затрат на производство. Задачи, которые необходимо решить в процессе модернизации, включают в себя анализ текущего состояния оборудования, выбор новых технологий и компонентов, а также внедрение систем автоматизации и управления.

Методика решения этих задач включает этапы анализа и диагностики существующего оборудования, разработку проектной документации, выбор современных материалов и технологий, а также проведение испытаний и обучения персонала. Это позволит обеспечить эффективное функционирование модернизированных станков и повысить общую эффективность производства.

В связи с изношенностью и моральным устареванием станочного парка страны крайне остро стоит проблема его модернизации. Возможными подходами к решению этой проблемы являются замена оборудования на новое, ремонт и модернизация имеющегося оборудования, закупка оборудования, поставляемого после ремонта и модернизации. Очевидно, что в каждом конкретном случае возможно экономически оптимальное сочетание указанных подходов. В общем случае можно утверждать, что новое оборудование целесообразно закупать в тех случаях, когда не удастся достичь требуемых показателей по точности, производительности, технологическим возможностям за счет ремонта и модернизации имеющегося или закупки модернизированного оборудования.

Из изложенного следует, что для принятия экономически эффективных решений в области модернизации парка каждому предприятию необходимо решать комплекс технико-экономических задач, включающий в себя:

- оценку технического состояния имеющегося парка;
- оценку принципиальной возможности выполнения стоящих перед предприятием технологических задач на имеющихся типах оборудования;
- определение недоработок и формулирование требований к технологическим возможностям, точности и производительности оборудования, способного устранить эти недоработки;
- ориентировочную оценку затрат, необходимых для ликвидации недоработок за счет закупок нового оборудования, ремонта и модернизации имеющегося оборудования или закупок оборудования после модернизации;
- ориентировочную оценку затрат, необходимых для поддержания в работоспособном состоянии имеющегося парка оборудования в рамках разрабатываемых на предприятиях планов ППР;
- оптимальный выбор исполнителей, привлекаемых к решению задач по модернизации парка (цены, состав, качество выполняемых работ).

Решение указанных задач требует определенного методического и организационного обеспечения. Помимо того, необходимо учитывать особенности рынка оборудования после модернизации и ремонта, который может стать одним из основных источников поступления на предприятия оборудования, необходимого для обновления парка, а также рынка услуг в области модернизации и ремонта имеющегося оборудования. Даже при наличии у предприятия достаточных средств для модернизации станочного парка за счет закупки нового оборудования использование модернизированного оборудования может оказаться более эффективным, чем закупка нового.

Приобретая модернизированное оборудование, можно выиграть в цене, в сроках поставки, в степени удовлетворения специфических требований конкретного заказчика к технологическим возможностям оборудования, в использовании имеющегося на предприятии парка технологической оснастки.

Рынок модернизированного оборудования может предложить:

- неиспользуемое оборудование в состоянии «как есть», без каких-либо ремонтных воздействий и гарантий работоспособности;
- оборудование после капитального ремонта. Поставляется в полном соответствии с паспортом. Гарантируются работоспособность и сохранение норм точности;
- оборудование после модернизации. Нормы точности – в соответствии с паспортом. Характер модернизации, как правило, – по согласованию с заказчиком. Гарантируются работоспособность и сохранение норм точности;
- услуги по модернизации и ремонту оборудования, имеющегося у заказчика. Характер ремонта и модернизации – по согласованию с заказчиком;
- услуги по техническому обслуживанию оборудования.

Рынок модернизированного оборудования и услуг по сравнению с рынком нового оборудования обладает рядом негативных особенностей. В частности, отсутствует система получения упорядоченной и достоверной информации о техническом состоянии оборудования, предлагаемого для продажи или поставки. Вызывает трудности определение ориентировочной стоимости ремонта в условиях рыночной экономики. Это затрудняет разработку планов ППР и порой делает невозможной их реализацию. Фирмы, специализирующиеся на поставке модернизированного оборудования и оказании услуг, часто не располагают производственными возможностями, достаточными для обеспечения высокого качества поставляемой продукции и выполняемых работ. Кроме этого отсутствует практика сертификации оборудования после капитального ремонта и модернизации, отсутствуют источники достоверной информации для выбора заказчиком наиболее квалифицированного и надежного поставщика.

Для создания методологических и организационных предпосылок, способствующих решению комплекса задач, о которых изложено выше, а также для устранения негативных факторов, препятствующих эффективному использованию возможностей рынка модернизированного оборудования и услуг, необходима разработка комплекса мер, регламентированных системой рекомендательных стандартов ассоциации.

Система стандартов должна охватывать следующие аспекты рассматриваемой проблемы: оценка технического состояния оборудования; ориентировочная оценка затрат на ремонт; ориентировочное определение затрат, необходимых для реализации плана ППР предприятия; выбор подрядчика для ремонта и модернизации оборудования; выбор оборудования; сертификация оборудования.

При проведении работ по модернизации неминуемо потребуется замена старого (неисправного, морально устаревшего) оборудования. Выбор нового должен производиться исходя из технических особенностей системы и экономической целесообразности его использования в каждом конкретном случае, так как именно стоимость комплектующих является основной статьей затрат при проведении модернизации.

В зависимости от уровня модернизации и сложности металлорежущей системы будет необходимо выбрать и заменить следующие виды оборудования:

- приводы главного движения (как преобразователь, так и саму рабочую машину);
- приводы подачи;
- приводы вспомогательных систем (электроприводы или гидроприводы);
- элементы системы питания;
- элементы релейно-контакторной схемы (наиболее целесообразно включать в состав схемы автоматики ПЛК);
- измерительные системы (угловые и линейные датчики перемещений);
- СЧПУ или УЦИ;
- при замене оборудования на новое необходимо полностью заменить и переложить все кабельные трассы.

Все работы по замене оборудования должны производиться в соответствии с техникой безопасности и отвечать всем нормам и рекомендациям по безопасности как фирм производителей комплектующих, так и нормам безопасности исходной системы. То есть должна быть в полной мере обеспечена вентиляция зон, где это необходимо, изоляция (как электрическая так и механическая), заземление и наличие механических средств технологической защиты (щитки, экраны, кабель-каналы и так далее).

Необходимость сертификации нового технологического оборудования, вводимого в эксплуатацию, предусматривается проектом Государственного стандарта «Технический регламент о безопасности машин и оборудования». Разрабатывается проект стандарта, предусматривающий сертификацию оборудования, вводимого в эксплуатацию после капитального ремонта и модернизации.

Проблема модернизации станочного парка остается актуальной из-за износа и морального устаревания оборудования. Для принятия экономически обоснованных решений необходимо провести комплексную технико-экономическую оценку, включающую анализ состояния оборудования, возможность выполнения технологических задач на имеющихся станках, определение требований к их характеристикам и оценку затрат на модернизацию.

В процессе модернизации потребуется замена устаревших компонентов, что должно осуществляться с соблюдением всех норм безопасности и технических регламентов. Сертификация нового оборудования, включая модернизированное, будет способствовать повышению надежности и безопасности его эксплуатации.

Л и т е р а т у р а

1. Модернизация старых станков: как повысить их производительность и эффективность. – URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/1085> (дата обращения: 31.03.2025).
2. Когда стоит обновлять станок с ЧПУ? – URL: <https://bapm.by/7-mifov-ob-obrabotke-na-stankah-s-chpu-cory-cory-cory-3-cory-cory-cory/> (дата обращения: 31.03.2025).
3. Модернизация станков по металлу. – URL: <https://rusnc.ru/poleznoe/modernizatsiya-stanochnogo-oborudovaniya/> (дата обращения: 31.03.2025).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОПТОВОЛОКОННОМ КАБЕЛЕ

С. С. Ивкин, С. М. Лебедев

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

Научный руководитель Л. В. Веппер

Представлен вариант подключения оптоволоконного кабеля к беспилотному летательному аппарату (БПЛА). Практическая значимость предложенного подключения заключается в повышении дальности и возможностей БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, оптоволоконный кабель.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) нашли применение во многих сферах жизни человека – от развлечений до промышленности. Проблемой классических БПЛА, управляемых через радиосигнал, является ухудшение связи с отдалением от оператора или если между БПЛА и оператором будет препятствие (например, стена). С ухудшением связи ухудшается и качество картинки, что критично при использовании БПЛА для визуальной диагностики труднодоступных объектов. Для решения данной проблемы предлагается использовать передачу сигнала через оптоволоконный кабель.

Оптоволоконный провод представляет собой сердечник, по которому проходит световой сигнал, и оболочку, которая имеет другую оптическую пропускную способность, для того чтобы свет не выходил из сердечника. Устройство оптоволоконного провода представлено на рис. 1 [1].

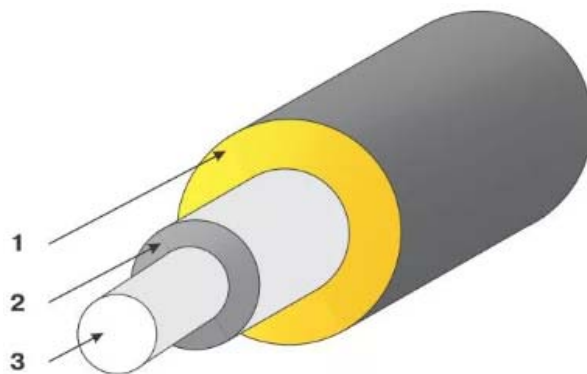


Рис. 1. Устройство оптоволоконного провода:
1 – защитное покрытие; 2 – оболочка; 3 – сердечник

Как правило, катушку с оптоволоконным кабелем крепят непосредственно на сам БПЛА. Такой вариант подключения имеет существенный недостаток: длина оптоволоконного кабеля и, как следствие, радиус полета БПЛА зависит от грузоподъемности самого БПЛА. Поэтому предлагаем размещать катушку с оптоволоконным кабелем не на БПЛА, а на «земле». Таким образом, исчезает привязка дальности полета к грузоподъемности беспилотника. Схема подключения оптоволоконного кабеля к БПЛА представлена на рис. 2.

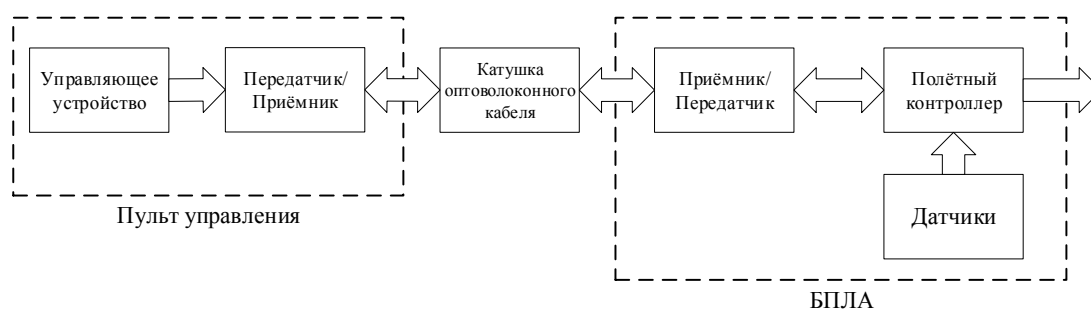


Рис. 2. Схема подключения оптоволоконного кабеля к БПЛА

Данную схему подключения можно усовершенствовать, добавив возможность заднего хода. Реализовать это можно путем добавления электродвигателя на катушку и контроллер, который будет синхронизировать скорость сматывания катушки и скорость движения хода. Данный механизм позволит использовать дроны на оптоволокне повторно. Усовершенствованная схема представлена на рис. 3.

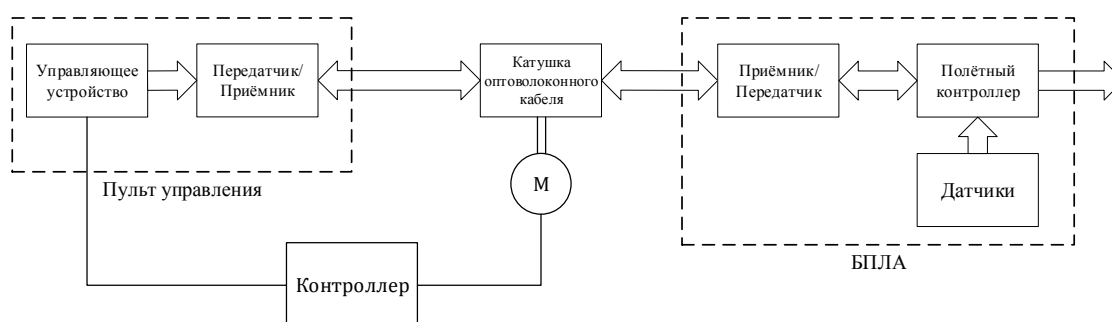


Рис. 3. Усовершенствованная схема подключения

Таким образом, внедрение оптоволоконного кабеля в систему управления БПЛА не только решает проблему связи на дальних дистанциях, но и существенно расширяет их функциональность. Перемещение катушки на землю позволяет дронам преодолевать большие расстояния без ограничения по весу, что открывает новые горизонты для их использования в визуальной диагностике и других областях. Дополнительные усовершенствования, такие как задний ход, делают эту технологию еще более универсальной и эффективной, способствуя дальнейшему развитию БПЛА и их интеграции в различные сферы деятельности.

Литература

1. «Дроны на веревочке»: плюсы и минусы оптоволоконных FPV-дронов. – URL: <https://dijstor.ru/blogs/blog/drony-na-verevochke-plyusy-i-minusy-optovolokonnyh-fpv-dronov?ysclid=m8ubww4na4563808706>.

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫМ СТЕНДОМ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. Ю. Рабков, Г. И. Калютич

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

Научный руководитель М. Н. Погуляев

Представлена система управления двигателем постоянного тока на микропроцессоре Arduino Nano. Приведена принципиальная электрическая схема и описывается ее алгоритм работы.

Ключевые слова: система управления, микропроцессор, датчики тока, двигатель постоянного тока.

Современные технологии управления и автоматизации процессов находят широкое применение в различных областях, включая образование и научные исследования. Одним из таких направлений является создание лабораторных стендов, которые позволяют студентам и исследователям изучать принципы работы электрических машин, систем управления и автоматизации. В данной работе рассматривается микропроцессорная система управления лабораторным стендом для исследования двигателей постоянного тока по методу взаимной нагрузки.

Лабораторный стенд с двигателями постоянного тока состоит из следующих основных компонентов:

1. Двигатели постоянного тока: основные элементы, которые преобразуют электрическую энергию в механическую. Они могут быть использованы для выполнения различных задач, таких как вращение валов, подъем грузов и т. д.

2. Микропроцессор: центральный элемент системы управления, который обрабатывает входные данные и управляет работой двигателей. В качестве микропроцессора используется Arduino Nano. Электрическая схема управления представлена на рис. 1.

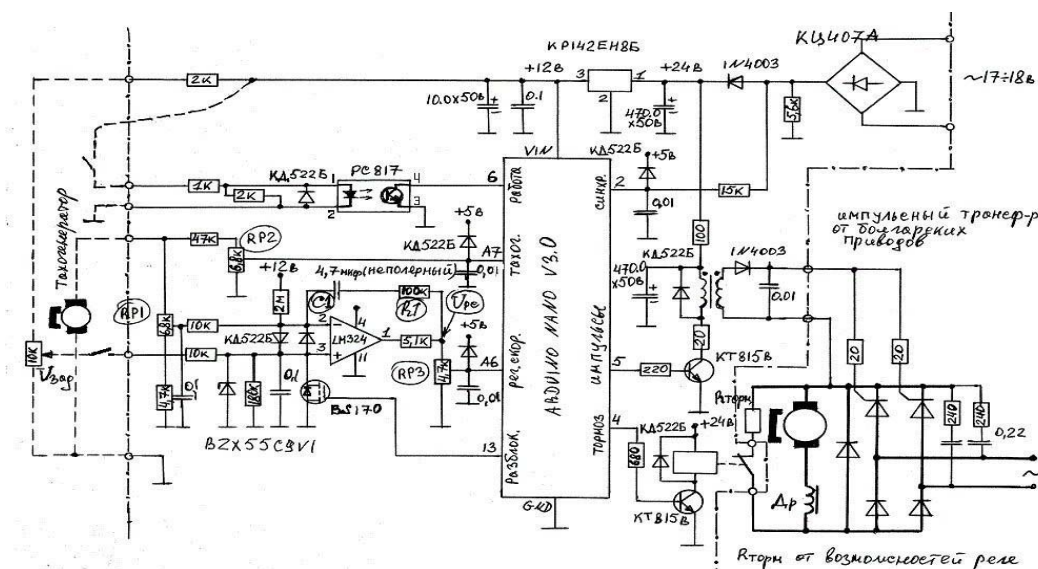


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема управления

3. Датчики: устройства, которые позволяют измерять различные параметры, такие как скорость вращения, положение вала, ток и напряжение. Датчики обеспечивают обратную связь для системы управления.

4. Программное обеспечение: программы, которые реализуют алгоритмы управления и обработки данных. Написаны на языках программирования, таких как C, Python.

5. Электронные компоненты включают в себя драйверы для управления двигателями, источники питания, резисторы, конденсаторы и другие элементы, необходимые для работы системы.

Микропроцессорная система управления работает по следующему принципу.

Датчики собирают информацию о текущем состоянии системы, скорости вращения двигателя или его положении. Микропроцессор обрабатывает полученные данные, сравнивает их с заданными параметрами и принимает решения о необходимости изменения работы двигателей. На основе принятых решений микропроцессор отправляет команды на драйверы двигателей, изменяя их скорость и направление вращения. Обратная связь позволяет системе получать данные от датчиков, что позволяет ей адаптироваться к изменениям в условиях работы и обеспечивать стабильное управление.

Применение лабораторного стенда. Лабораторный стенд с двигателями постоянного тока может использоваться для различных целей:

– обучение. Студенты могут изучать основы электротехники, автоматизации и управления, проводя эксперименты с различными режимами работы двигателей.

– исследования. Ученые могут использовать стенд для проведения экспериментов, связанных с динамикой и управлением электрическими машинами.

– разработка и тестирование. Инженеры могут разрабатывать и тестировать новые алгоритмы управления и системы автоматизации.

Разработана система управления двигателями постоянного тока на основе микропроцессора Arduino Nano, которая позволяет управлять двигателями постоянного тока лабораторного стенда, снимать их скоростные и механические характеристики, анализировать параметры напряжения и тока, а также регулировать величину нагрузки с помощью программного кода.

ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А. А. Белоусов

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

Научные руководители: А. В. Козлов, М. П. Тиличенко

Частотный преобразователь трехфазного тока для электродвигателей, формирование импульсов, управления трехфазным трансформаторным инвертором.

Ключевые слова: частотный, частота, транзистор, биполярных, микросхема, ключ, генератор.

Существенным недостатком асинхронных электродвигателей является сложность и стоимость оборудования, применяемого для обеспечения плавного регулирования скорости вращения ротора путем изменения частоты переменного тока, питающего статорные обмотки электродвигателя. Сложность оборудования обусловлена не только тем, что требуется трехфазный генератор необходимой мощности с плавно регули-

руемой частотой, но и тем, что одновременно с уменьшением частоты генератора следует уменьшать и величину напряжения.

Схема однофазного инвертора. Схема однофазного инвертора приведена в [1]. Параметры элементов схемы управления определялись исходя из номинальных параметров электродвигателя ($U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$, $P_{\text{ном}}$). Схема управления содержит генератор тактовых импульсов с регулируемой частотой f_1 на микросхеме K561ЛН2 (элементы DD1.1, DD1.2, DD1.3), сдвиговый регистр K561ИР2, работающий в режиме ждущего мультивибратора (элементы DD2, DD1.4, DD1.5), одновибратор на микросхеме K561ТМ2 (элемент DD3.1), микросхему K561ЛП13 (элементы DD4.1, DD4.2), выполняющую операцию «логическое умножение» (2И) и выходные эмиттерные повторители на транзисторах КТ817. Эта схема обеспечивает регулировку частоты переключения силовых ключей VT1, VT2 инвертора в противофазе, что необходимо для получения двухполярного напряжения $U_4(t)$ на выходе инвертора. Регулировка действующего напряжения U_4 обеспечивается изменением скважности управляющих импульсов путем соответствующего выбора параметров конденсатора C3 и резистора R4 одновибратора. При этом схемой обеспечивается и одновременное изменение частоты. Временные синхронизированные диаграммы напряжений на выходах схемы управления представлены в [1].

При снижении частоты вращения ротора однофазного конденсаторного асинхронного электродвигателя длительность импульсов на выходе одновибратора остается неизменной, а паузы между ними увеличиваются, что уменьшает действующее напряжение U_4 на выходе инвертора. Емкость C1 подбирается экспериментально. Конденсаторы C2 и C3 (рис. 1) защищают ключи VT1 и VT2 от перенапряжений. Транзисторы VT1 и VT2 выбираются с учетом пускового тока двигателя и напряжения, при этом их допустимое напряжение «коллектор – эмиттер» должно быть больше удвоенного значения напряжения на выходе выпрямителя.

Схема преобразователя однофазного напряжения в трехфазное. Схема преобразователя однофазного напряжения в трехфазное, основанная на трех однофазных инверторах, выходные (повышающие) обмотки трансформаторов Tr1, Tr2, Tr3 которых соединены в звезду. Формирователь импульсов регулирует частоту вращения ротора трехфазного асинхронного электродвигателя и действующее значение напряжения, подаваемого на его статорные обмотки. Данная схема также приведена в статье [1].

Формирователь импульсов управления трехфазным трансформаторным инвертором. Формирователь содержит пять микросхем 561 серии и питается от источника стабилизированного напряжения 12В.

Формирователь работает следующим образом. На элементах DD1.1-DD1.3 собран генератор однополярных прямоугольных с регулируемой частотой $f_r = 180 - 360$ Гц. Эти импульсы подаются на вход «с» счетчика DD1.2, работающего в режиме делителя частоты. В результате на выходах 5, 6, 13 этого счетчика формируется трехфазное однополярное напряжение с регулируемой частотой $\frac{f = f_r}{6} = 180 - 360$ Гц.

На выходах 12, 10, 8 элементов DD1.4, DD1.5, DD1.6 формируется трехфазное напряжение \underline{V}_A , \underline{V}_B , \underline{V}_C инверсное по отношению к напряжению V_A , V_B , V_C на выходах счетчика.

На трех микросхемах DD1.3, DD1.4, DD1.5 собраны шесть одновибраторов, запускаемых каждый своим сигналом \underline{V}_A , \underline{V}_B , \underline{V}_C , V_A , V_B , V_C .

Параметры элементов R , C всех одинаковы и выбираются такими, чтобы на максимальной чистоте напряжения \underline{VA} и \underline{VA} , \underline{VB} и \underline{VB} , \underline{VC} и \underline{VC} не накладывались, а имели минимальный интервал треугольник t_{\min} , необходимый для поочередной коммутации транзисторов каждого инвертора.

При использовании полевых или GBT транзисторов импульсных управлениях с выходом одновибраторов можно называть на затворы транзисторов через резистивный делитель, а при использовании биполярных транзисторов необходимо называть импульсы на базу через эмитерные повторители (усилители мощности) [2, 3]. Для элементов DD1.1-DD1.6 схема открытия ключей приведена на рис. 1.

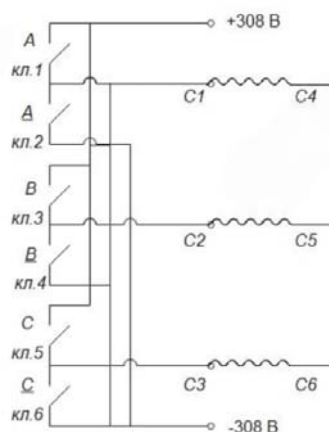


Рис. 1. Схема открытия ключей биполярных транзисторов

В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено следующее:

- разработана схема управления и проведена экспериментальная оптимизация параметров ее элементов для однофазного инвертора;
- изготовлена и настроена экспериментальная установка для демонстрации частотного регулирования скорости вращения ротора однофазного асинхронного электродвигателя с пусковым конденсатором;
- разработана схема преобразователя однофазного сетевого напряжения в трехфазное на основе трех однофазных инверторов;
- разработана схема управления и проведена экспериментальная оптимизация параметров ее элементов для трехфазного инвертора;
- проверена, испытана и отлажена работа частотного преобразователя путем подбора компонентов схемы для стабильной работы.

Литература

1. Козлов, А. В. Схемотехническая реализация частотного регулирования скорости вращения роторов асинхронных электродвигателей / А. В. Козлов, М. П. Тиличенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 99–104. – DOI 10.62595/1819-5245-2024-4-99-104
2. Дацковский, Л. Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе / Л. Х. Дацковский, В. И. Роговой, В. А. Абрамов // Электротехника. – 1996. – № 10. – С. 18–28.
3. Усманходжаев, Н. М. Методы регулирования скорости однофазных конденсаторных асинхронных двигателей / Н. М. Усманходжаев. – М. : Энергия, 1980. – 120 с.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Чжан Лифан

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

Научный руководитель В. А. Савельев

В работе приведен анализ основных требований к современной интеллектуальной системе мониторинга и диагностики промышленного оборудования, что может служить основой для создания системы удаленного мониторинга, соответствующей требованиям современной промышленности.

Ключевые слова: интеллектуальная система, передача данных, мониторинг, промышленное оборудование, совместимость.

Четвертая промышленная революция (Индустрия 4.0) предполагает новый подход к производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий в промышленность, масштабной автоматизации бизнес-процессов и распространении искусственного интеллекта. Технология удаленного мониторинга промышленного оборудования, являясь ключевым элементом промышленной информатизации, может значительно повысить эффективность управления оборудованием, снизить уровень простоев из-за неисправностей и продлить срок службы оборудования. Согласно отчету известного маркетингового агентства *Gartner*, опубликованному в 2023 г., более 75 % производственных предприятий постепенно внедрились технологии удаленного мониторинга.

В настоящее время в различных источниках авторы предлагают различные подходы к решению проблемы удаленного мониторинга промышленного оборудования. Так, в [1], в рамках исследования технологий удаленного управления промышленным оборудованием, рассмотрено использование технологий *NAT*-туннелирования и *USB over IP* для реализации удаленного программирования и мониторинга промышленного оборудования. В [2] рассматривают применение технологий удаленного мониторинга в области сельского хозяйства и предлагают интегрированную информационную архитектуру под названием *BHiveSense*, основанную на Интернете вещей и микросервисах, для устойчивого удаленного мониторинга и управления пчеловодческими хозяйствами. В [3] описана система удаленного визуального контроля за распределением и потреблением электроэнергии на основе архитектуры больших данных, используя преимущества больших данных для поддержки удаленного визуального управления электрическими сетями.

С учетом текущего состояния промышленного производства система удаленного мониторинга промышленного оборудования должна решать следующие основные проблемы.

Основной проблемой, с которой сталкиваются системы удаленного мониторинга промышленного оборудования, является нестабильная передача данных. В процессе промышленного производства оборудование постоянно генерирует большое количество эксплуатационных данных, таких как температура, давление, частота вибрации, скорость работы и т. д. Эти данные являются важной основой для предприятий, чтобы понять состояние оборудования и принимать производственные решения. Однако в настоящее время нестабильная передача данных может привести

к потере данных и задержкам, что, в свою очередь, влияет на своевременное определение и обработку отказов оборудования. Например, в химическом производстве нестабильная передача данных о температуре при ее аномальном росте не позволит системе мониторинга своевременно получить точные данные, что может привести к неконтролируемой реакции, вызвать аварийную ситуацию, а также привести к снижению качества продукции и потере производственной эффективности.

Передача данных должна обладать высокой надежностью, чтобы гарантировать, что данные не будут потеряны из-за сетевых сбоев, внешних помех и других факторов. Это требует использования надежных сетевых протоколов и технологий передачи, таких как выбор протоколов с механизмами коррекции ошибок и повторной передачи на уровне сетевого протокола, чтобы обеспечить целостность данных в процессе передачи. Для того чтобы предприятия могли своевременно получать информацию о состоянии оборудования, передача данных должна обладать низкой задержкой. В идеальных условиях данные оборудования должны передаваться в центр мониторинга за миллисекунды или секунды. Это требует оптимизации сетевой архитектуры, уменьшения количества узлов в пути передачи данных и повышения скорости передачи данных. С увеличением уровня интеллектуализации промышленного оборудования объем данных растет экспоненциально. Поэтому система удаленного мониторинга должна обладать высокой пропускной способностью, чтобы удовлетворить требования одновременной передачи больших объемов данных от нескольких устройств. Например, для производств с требованиями к видеонаблюдению в высоком разрешении необходима достаточная сетевая пропускная способность для обеспечения плавной передачи видеоданных.

Второй проблемой является недостаточное быстродействие мониторинга в реальном времени, что может привести к тому, что предприятия не смогут своевременно реагировать на сбои оборудования и аномалии в производственном процессе. В современном производстве процессы высоко автоматизированы и непрерывны, и отказ оборудования часто вызывает цепную реакцию, влияя на работу всей производственной линии. Если мониторинговая система не может в реальном времени предоставлять информацию о состоянии оборудования, предприятиям будет трудно обеспечить эффективность производства и качество продукции. Например, в производственной линии сборки автомобилей, если ключевое оборудование, такое как роботизированная сварочная рука, выходит из строя, а мониторинговая система не может подать сигнал тревоги в реальном времени, сварочная рука может продолжать сварку в неправильном положении, что приведет к проблемам с качеством автомобиля, в то время как остановка производственной линии также вызовет огромные экономические потери.

Мониторинговая система должна быть способна к мгновенному сбору данных оборудования, чтобы обеспечить получение соответствующих данных в момент изменения состояния оборудования. Это требует оптимизации производительности аппаратного обеспечения для сбора данных, например, с использованием высокоскоростных датчиков и высокоточных карт сбора данных, чтобы повысить частоту и точность сбора данных. После получения данных оборудования мониторинговая система должна обладать возможностью анализа данных в реальном времени. С помощью современных алгоритмов и программных технологий данные, собранные в процессе мониторинга, должны быстро анализироваться и обрабатываться для своевременной оценки наличия потенциальных отказов или аномалий в работе обо-

рудования. Например, использование алгоритмов машинного обучения для анализа данных о вибрации оборудования в реальном времени позволяет заранее предсказать время отказа оборудования. Когда мониторинговая система обнаруживает отказ или аномалию в работе оборудования, она должна иметь механизм быстрого оповещения, способный в кратчайшие сроки отправить информацию о тревоге соответствующим лицам. Это можно реализовать различными способами, такими как звуковая и световая сигнализация, *SMS*-уведомления, *push*-уведомления мобильных приложений и т. д., чтобы соответствующие лица могли в кратчайшие сроки получить сигнал тревоги и принять меры.

Третьей проблемой является плохая совместимость системы, что также может привести к значительным трудностям для предприятий при создании системы удаленного мониторинга, увеличивая затраты на интеграцию системы, снижая эффективность управления оборудованием и препятствуя технологическому обновлению и инновациям. Например, предположим, что на предприятии есть как устройства, использующие интерфейс *RS-232* и операционную систему *Windows*, так и устройства, использующие *Ethernet*-интерфейс и операционную систему *Linux*. Если система удаленного мониторинга не может быть совместима с этими устройствами, то невозможно будет осуществить единый мониторинг и управление всеми устройствами.

Система удаленного мониторинга должна быть совместима с различными распределенными аппаратными интерфейсами промышленного оборудования, включая (но не ограничиваясь) последовательный порт, *USB*, *Ethernet*, *PCIe* и т. д. Это можно реализовать с помощью универсальных технологий преобразования интерфейсов и аппаратных модулей, например, используя многофункциональные преобразователи интерфейсов, которые могут гибко переключаться между различными типами интерфейсов. В программном обеспечении мониторинговая система должна быть совместима с различными операционными системами и программным обеспечением, поставляемым с устройствами. Это требует использования стандартизированных протоколов программной связи, таких как *OPC-UA*, чтобы обеспечить обмен данными и взаимную работу между различными программными системами. В то же время мониторинговая система должна обладать достаточной открытостью и масштабируемостью, чтобы адаптироваться к программным системам различных устройств через разработку промежуточного ПО или плагинов. Чтобы соответствовать разнообразной *IT*-среде предприятий, система удаленного мониторинга должна обладать кроссплатформенной поддержкой, обеспечивая стабильную работу на различных операционных системах (таких как *Windows*, *Linux*, *Unix* и т. д.) и аппаратных платформах. Это помогает предприятиям успешно развертывать и применять систему удаленного мониторинга без замены существующей *IT*-инфраструктуры.

Таким образом, основные требования к удаленному мониторингу промышленного оборудования включают стабильную передачу данных, достаточную актуальность данных мониторинга в реальном времени и хорошую совместимость системы мониторинга с оборудованием предприятия. Выполнение этих основных требований имеет решающее значение для предприятий в достижении интеллектуального производства, повышении производительности и обеспечении безопасности производства и снижения операционных затрат.

Л и т е р а т у р а

1. Kozovsky, M. Remote Programming and Monitoring of Industrial Devices Using NAT Traversal and USB Over IP. IFAC Papers OnLine, 2016.

2. BHiveSense: An integrated information system architecture for sustainable remote monitoring and management of apiaries based on IoT and microservices / C. Duarte, M. José, M. Henrique [et al.] // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2023, 9 (3).
3. Power marketing and distribution network remote visual control system based on big data architecture / Z. Xueqin, W. Xudong, D. Jing [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2030 (1).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОЧНЫХ ШКАФОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Цзя Шусян

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

Научный руководитель М. Н. Погуляев

Рассмотрены результаты исследований нагрузочных шкафов дизельных генераторов за последние годы, сравниваются технические требования различных современных нагрузочных устройств, проведен сравнительный анализ их применений, представлены рекомендации по нагрузочному тестированию резервных дизельных генераторов.

Ключевые слова: дизельный генератор; нагрузочный шкаф; нагрузочное тестирование.

Нагрузочный шкаф представляет собой сложное устройство, объединяющее функции управления, регулирования, измерения и защиты, которое может осуществлять нагрузочное тестирование и обслуживание генераторов, источников бесперебойного питания (ИБП), электротранспортных устройств и других компонентов за счет совместной работы таких элементов, как симуляторы нагрузки, контроллеры, дисплеи и датчики, обеспечивая надежную поддержку для стабильности и надежности этих устройств в различных условиях эксплуатации. Для дизельных генераторов при нагрузке ниже 50 % или в режиме холостого хода обязательно возникает легкая нагрузка, что приводит к недостаточному сгоранию топлива, образованию углерода, снижению общей эффективности машины, что в итоге может привести к сбоям при запуске, недостаточной мощности, чрезмерному расходу топлива, преждевременному ремонту цилиндров и даже к выходу из строя [1]. Чтобы избежать этих проблем, нагрузочный шкаф создает нагрузочный ток, имитируя работу генератора в реальных сложных условиях в режиме холостого хода, предоставляя эффективные средства для тестирования и обслуживания генераторных установок, а также проверяя характеристики генератора без прерывания фактической нагрузки.

Система тестирования дизельных генераторов в основном проводит тесты статической стабильности, динамической стабильности, тесты на переходные отклики, тесты на энергоэффективность, тесты на автоматическое переключение, тесты на усталостный ресурс и другие [1]. Как показано в таблице, в реальной работе для удовлетворения различных сценариев применения и требований к тестированию были разработаны различные типы нагрузочных шкафов для дизельных генераторов.

Резистивный нагрузочный шкаф, шкаф нагрузки с резисторами и индукторами и шкаф нагрузки с резисторами, конденсаторами и индукторами – это три распространенных типа для нагрузочного тестирования дизельных генераторов. Их основные различия заключаются в составе нагрузочных элементов и типах нагрузки, которые они могут моделировать. Резистивный нагрузочный шкаф в основном выполняет моделирование реальной нагрузки с помощью резистивных элементов,

предназначенных для имитации чисто резистивной нагрузки. Хотя его конструкция проста и управление удобно, он не может оценить производительность генератора в условиях сложной нагрузки.

Типы нагрузочных шкафов, подходящие для различных сценариев применения и их сравнение

Тип	Функции и характеристики	Сценарии применения
Резистивный нагрузочный шкаф	Симулирует реальную нагрузку с помощью резистивных элементов, имеет простую структуру и низкую стоимость	Подходит для базового нагрузочного тестирования в случаях, когда требования к коэффициенту мощности не высоки
Шкаф нагрузки с резисторами и индукторами	Сочетает резистивные и индуктивные элементы, симулирует резистивную и индуктивную нагрузку	Подходит для сценариев, где необходимо симулировать нагрузки, такие как освещение и электродвигатели
Шкаф нагрузки с резисторами, конденсаторами и индукторами	Интегрированные резистивные, конденсаторные и индуктивные элементы, способные моделировать сложные нагрузки	Подходит для комплексной оценки производительности, особенно в сценариях, где необходимо моделировать различные характеристики нагрузки
Умный контрольный нагрузочный шкаф	Оснащен современными контроллерами, дисплеями и датчиками, которые могут автоматически регулировать величину нагрузки	Подходит для высокоточных и автоматизированных тестовых испытаний, исследовательских испытаний

Например, в исследовании Риготте использовался резистивный нагрузочный шкаф для сравнения единичного потребления и энергетической эффективности различных биодизелей и дизельного топлива при различных условиях нагрузки, и было установлено, что с увеличением резистивной нагрузки значение энергетической эффективности биодизеля становится ближе к значению дизельного топлива [2]. Шкаф нагрузки с резисторами и конденсаторами и шкаф нагрузки с резисторами, конденсаторами и индукторами основаны на резистивном нагрузочном шкафу, к которому добавлены элементы конденсаторов и индукторов для моделирования емкостной и индуктивной нагрузки, что позволяет оценить работу двигателя при емкостной нагрузке (например, повышение напряжения, изменение коэффициента мощности и т. д.) и производительность в условиях сложной нагрузки (включая пусковую нагрузку, нагрузку от электродвигателя и емкостную нагрузку и т. д.). Оба варианта более подходят для комплексной оценки производительности двигателя, но при этом производственные затраты, эксплуатационные и обслуживающие расходы также выше.

В последние годы, чтобы соответствовать более высоким требованиям к точности и автоматизации тестирования, исследование и развитие умных контрольных нагрузочных шкафов становятся все более актуальными.

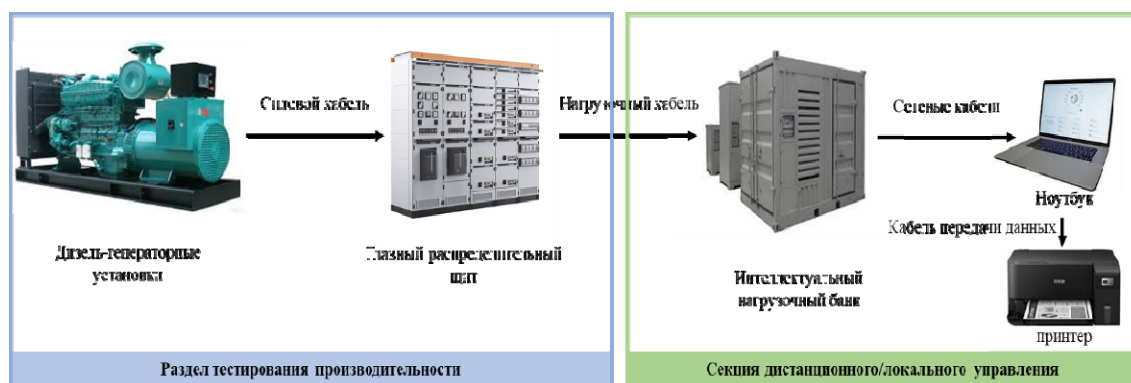


Рис. 1. Схема умного контрольного нагрузочного шкафа

Как показано на рис. 1, благодаря интеграции современных коммуникационных технологий, технологий автоматического управления и силовой электроники, умный контрольный нагрузочный шкаф может осуществлять автоматическую регулировку и оптимизацию нагрузки с помощью встроенного микропроцессора и интеллектуальных алгоритмов, а также поддерживать удаленный мониторинг и управление, позволяя пользователям в любое время получать информацию о состоянии работы оборудования через интернет или специализированное программное обеспечение для мониторинга. Исследования показывают, что внедрение цифровых технологий может значительно повысить точность и оперативность мониторинга таких показателей, как расход топлива. Однако реализация интеллектуальных систем по-прежнему зависит от высокоточных датчиков и более продвинутых алгоритмов обработки данных, что также приводит к более высоким затратам на разработку и производство умных контрольных нагрузочных шкафов, а также к более строгим условиям адаптации к окружающей среде. В настоящее время с учетом продвижения возобновляемых источников энергии и строительства умных электросетей, спрос на эффективные и энергосберегающие нагрузочные шкафы будет продолжать расти, что также будет способствовать развитию будущего мобильных нагрузочных шкафов для дизельных генераторов в направлении интеллектуализации, интеграции, экологичности и индивидуализации. Через технологические инновации и расширение рынка будут предоставлены более эффективные, точные, безопасные и экологически чистые решения для тестирования производительности генераторов [3].

Литература

1. A systematic review on power system resilience from the perspective of generation, network, and load[J] / C. Wang, P. Ju, F. Wu [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112567.
2. Energy efficiency of engine-generator set using biofuels under varied loads[J] / M. R. Rigotte, D. Secco H. A. Rosa [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – N 79. – P. 520–524.
3. 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.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ

Тэн Цинсюнь

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

Научный руководитель В. В. Брель

Искусственный интеллект и машинное зрение как инструменты для промышленных установок в электроэнергетике; использование различных изображений электродвигателей, трансформаторов тока для анализа состояния оборудования в промышленных установках.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное зрение, изображение, электродвигатель, трансформатор, нагрев.

Искусственный интеллект (ИИ) и машинное зрение включает в себя получение изображений, их обработку и использование полученных данных для решения инженерных задач без участия человека.

Искусственный интеллект используется в самых разных отраслях. Его применение включает контроль качества, автоматическую идентификацию, робототехнику и др. Техобслуживание и ИИ помогает снижать количество сбоев и аварий. Это уменьшает время простоя и помогает оптимально планировать техобслуживание.

Процесс машинного зрения можно разделить на несколько этапов:

- 1) процесс получения изображений с помощью камер или других оптических устройств;
- 2) процесс преобразования изображений в числовые данные, необходимые для анализа;
- 3) процесс анализа изображения анализирует полученные данные и выявляет интересующие явления;
- 4) процесс принятия решения ИИ.

Контроль локального перегрева промышленных установок часто возникает в местах присоединения.

К примеру, процесс обработки изображения ИИ – термограмма электродвигателя и трансформаторов тока на рис. 1.

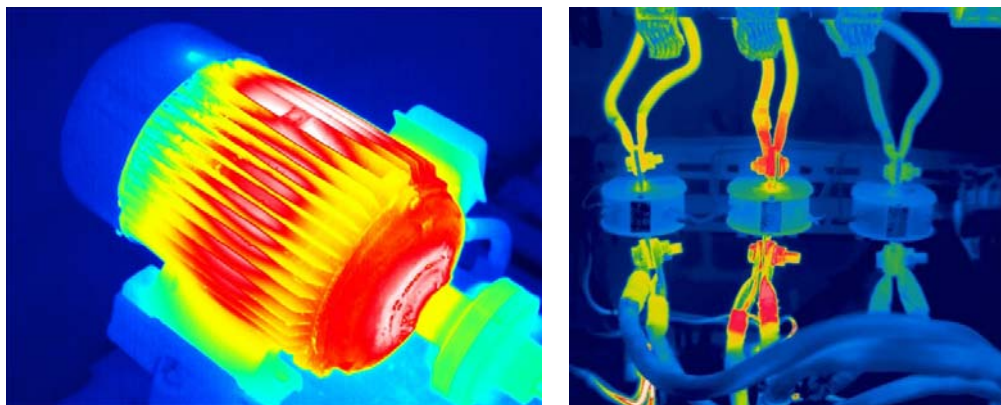


Рис. 1

Обрабатываем изображение морфологической трансформацией по формулам (1) и (2).

$$I_{dil}[x, y] = \frac{\max}{-2 \leq i \leq 2} I_{seg0}[x + i, y]; \quad (1)$$

$$I_{seg1}[x, y] = \frac{\min}{-1 \leq i \leq 1, -1 \leq j \leq 1} I_{dil}[x + i, y + j], \quad (2)$$

где $I_{dil}[x, y]$ – градиент отсечения по координатам (x, y) ; $I_{seg0}[x + i, y]$ – градиент начальной морфологической трансформации по координатам $(x + i, y)$; $I_{seg1}[x, y]$ – градиент морфологической трансформации по координатам (x, y) .

Система предиктивной диагностики оборудования в промышленных установках представляет собой комплекс программно-аппаратных средств, предназначенных для постоянного контроля технического состояния оборудования и прогнозирования неисправностей на основе данных, получаемых в реальном времени. В современных условиях на промышленном производстве необходимо использовать ИИ, включая внедрение умных систем для диагностики промышленных установок. Основная задача – непрерывный контроль состояния различных частей промышленных установок.

Системы на основе ИИ включают в себя несколько основных компонентов:

1. Система диагностики – основной собирающий источник данных. Содержит датчики, сенсоры и другие устройства, предназначенные для мониторинга параметров работы.

2. Система сбора и передачи данных – отвечает за сбор данных от бортовой системы диагностики и их передачу на центральный пункт.

3. Центральный пункт анализа данных – обрабатывает поступающую информацию, используя алгоритмы машинного обучения и нейронные сети для анализа и предсказания состояния оборудования.

Необходимо поэтапное внедрение технологий ИИ, оценка на простых инженерных проектах эффективности новых технологий, а также разработка алгоритмов принятия и выработки управляющих решений, применяемых для промышленных установок.

При помощи ИИ и машинного зрения возможно создать комплекс программно-аппаратных средств, предназначенных для постоянного контроля технического состояния оборудования и прогнозирования неисправностей на основе данных, получаемых в реальном времени. Оптимальное своевременное проведенное техническое обслуживание повысит надежность эксплуатации промышленных установок.

Л и т е р а т у р а

1. Худорожков, С. И. Глубокое обучение в MATLAB для задач детектирования и слежения: Учебное пособие / С. И. Худорожков, А. А. Котенко. – СПб. : Санкт-Петербург. политех. ун-т Петра Великого, 2024. – 131 с.
2. Истратова, Е. Е. Разработка и исследование биометрической системы распознавания лиц на основе применения метода глубокого обучения / Е. Е. Истратова, Д. А. Пустовских // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – Т. 10, № 12. – С. 66–74.
3. Мугутдинов, Р. М. Особенности цифровой трансформации в промышленности / Р. М. Мугутдинов, А. А. Горовой // Вестник Академии знаний. – 2022. – № 48 (1). – С. 216–226.
4. Мельников, В. И. Искусственный интеллект: теоретические и практические аспекты / В. И. Мельников. – М. : Наука, 2020. – 320 с.

СТАРТ-СТОПНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Д. Д. Лашкевич

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

Научный руководитель В. В. Логвин

Рассмотрены методы повышения эффективности шаговых приводов за счет комбинации старт-стопного управления и режима бесконтактной машины постоянного тока. Основной целью исследования является увеличение рабочей скорости привода, снижение параметрических колебаний и минимизация силовых воздействий на механизм.

Ключевые слова: шаговый двигатель, старт-стопное управление, бесконтактная машина постоянного тока (БМПТ), позиционирование, MATLAB/Simulink, фазное возбуждение.

Решением задачи повышения рабочей скорости привода с шаговым двигателем (ШД) является режим замкнутого привода, переводящий структуру «ШД-датчик шагов» в структуру бесконтактной машины постоянного тока (БМПТ). При этом максимальные скорости движения возможно увеличить почти на порядок в сравнении с режимом приемистости и снизить влияние параметрических колебаний. Возможность разрыва структуры БМПТ сохраняет универсальность ШД в приводах, где ШД выполняет на различных этапах перемещения функции скоростного двигателя и элемента прецизионного позиционирования.

Важным качеством ШД в режиме БМПТ является возможность управления движущим моментом (ускорением привода) в переходных процессах разгона и торможения, стабилизации и управления скоростью в установившихся режимах движения, выполняемого прежде всего регулированием угла коммутации фаз по программе или автоматически. Это особо ценно при необходимости выполнения требований по ограничению силового воздействия двигателя на приводной механизм [1, 2].

Проведенная оценка достижимых скоростей позиционирования и обработки контуров при сочетании в шаговом приводе режима БМПТ при позиционировании и старт-стопного режима при обработке контуров. В режиме БМПТ максимально достижимые частоты вращения ШД является величина 3000 шагов в секунду, что при цене единичного шага, равной 0,1 мм, составит 300 мм/с [3]. При указанной максимальной частоте старт-стопных перемещений с дискретностью 0,1 мм максимальная линейная скорость обработки контуров будет достигать величины 20–25 мм/с. Следует отметить, что все преимущества шагового привода при сочетании этих двух режимов сохраняются, а именно: отсчет перемещений при позиционировании суммированием импульсов с датчика шагов, программирование последовательности единичных шагов по координатам при обработке контуров, число-импульсный вариант построения системы.

Выполнен анализ описанных способов построения систем шагового привода с позиций сложности технической реализации, быстродействия, оценки влияния электрических переходных процессов в фазных обмотках. Сделан вывод о необходимости исследования способов старт-стопного управления ШД на основе модели шагового привода, учитывающей электромагнитные переходные процессы в обмотках двигателя.

В программном пакете MATLAB/Simulink была исследована зависимость статической ошибки положения ротора ШД от момента нагрузки, где было показано, что введение еще одного управляющего воздействия – регулирования уровня возбу-

ждения фазных обмоток – позволяет свести разность энергий разгона и торможения к нулю независимо от позиции переключения или изменения возбуждения фаз. Рационально переключать фазы и уровень их возбуждения в середине шагового интервала. Регулирование возбуждения фаз является способом ограничения силовых воздействий на приводной механизм.

Литература

1. Башарин, А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 392 с.
2. Гумен, В. Ф. Следящий шаговый электропривод / В. Ф. Гумен, Т. В. Калининская. – Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с.
3. Мясников, В. А. Программное управление оборудованием / В. А. Мясников, М. Б. Игнатьев, А. М. Покровский. – 2-е изд. – Л. : Машиностроение, 1984. – 427 с.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЫТА

А. С. Мурач

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

Научные руководители: А. В. Сахарук, А. Е. Запольский

Описаны особенности разработки информационной системы, предназначенной для автоматизации приема заявок в службу приема заявок энергетической организации. Представленное решение позволяет пользователям отправлять обращения через приложение, а диспетчерам – обрабатывать их в цифровом виде. Система включает функции учета пользовательских данных и интеграции с «умными» счетчиками электроэнергии.

Ключевые слова: информационная система, клиент-серверная архитектура, пользовательское приложение, база данных, прием заявок.

Стабильная работа энергосистемы страны, включая подачу электроэнергии, является важной задачей. Выход из строя отдельных узлов энергетической системы может привести к серьезным последствиям и крупным авариям. Иногда даже кратковременные перебои в подаче энергии объектам могут дезорганизовать их работу, а также нанести экономический урон.

Граждане, чтобы сообщить о проблеме по вопросам энергетики, могут связаться с диспетчерской службой энергетического оператора, позвонив по номеру 144, и выбрать соответствующую категорию в зависимости от решаемой проблемы.

Диспетчер района электрических (РЭС) сетей отвечает на звонок, принимает заявку от потребителя, оценивает важность и приоритет этой проблемы. Приоритетные заявки он записывает в журнал приема заявок, которые будут выполняться в порядке живой очереди. Если диспетчер района сетей оценивает эту заявку как срочную (например, обрыв провода, возгорание ТП и т. д.), то он направляет оперативно-выездную бригаду для срочного выполнения приоритетной задачи. Если это плановая заявка, например, растущие ветки дерева, которые потенциально могут повредить линию электропередачи, то она записывается в журнал неисправностей. После этого о данной заявке докладывается начальнику РЭС, который определяет персональный и количественный состав бригады, необходимой для решения данной проблемы, а также сроки ее исполнения. В качестве примера в таблице отображена статистика поступивших звонков от 02.10.2022.

Пример статистики звонков 02.10.2022

Параметр	Значение
Всего вызовов	719
С сотовых устройств	668
Со стационарных устройств	51
Общалось с диспетчером района сетей	176 человек
Средняя продолжительность разговора с диспетчером района сетей	54,14 с
Средняя продолжительность ожидания абонента	2145 с – всего; 1024 с – с диспетчером района сетей
Вызовы без разговора с диспетчером района сетей	543
Звонили 2 раза	4 человека
Звонили дважды, первый раз не дозвонились	12 человек
Звонили дважды, второй раз не дозвонились	9 человек
Не дозвонились 2 раза	50 человек
Не дозвонились 3 раза	20 человек
Не дозвонились 4 раза	12 человек
Звонили 3 раза, 1 раз дозвонились	7 человек
Звонили 3 раза, 2 раза дозвонились	6 человек
Звонили 4 раза, 1 раз дозвонились	5 человек
Не дозвонились 5 раз	4 человека
Звонили 5 раз, 1 раз дозвонились	2 человека
Не дозвонились 6 раз	5 человек
Звонили 6 раз, 2 раза дозвонились	3 человека
Не дозвонились 7 раз	1 человек
Звонили 7 раз, 1 раз дозвонились	2 человека
Не дозвонились 7 раз, на 8-й раз дозвонились	2 человека
Не дозвонились 8 раз, на 9-й раз дозвонились	1 человек
Не дозвонились 11 раз, на 12-й раз дозвонились	1 человек
Не дозвонились 14 раз	1 человек
Звонки, переадресованные в службу «115.бел»	71 человек

Из статистики видно, что недостатками системы является долгое ожидание, большое количество попыток звонков, наличие несостоявшихся дозвонков, что может оказаться категоричным фактором при крупной аварии или бедствии.

Решить эти проблемы может комплексная информационная система. Данная система представляет из себя аппаратно-программный комплекс. Основой аппаратной части является сервер, на котором находится основная база данных. Программная часть представлена базой данных и клиентскими приложениями. Пользователь после авторизации получит доступ к своей учетной записи. Он может выбрать категорию заявки, описать свою проблему и отправить ее администратору (в роли администратора – диспетчер района сетей). Гражданину не нужно дозваниваться и находиться в очереди, что существенно упрощает процесс связи с диспетчером района сетей и подачи заявки. Диспетчеру района сетей уже не нужно будет отвечать на звонки, и записывать полученные заявки в журналы, они будут отображаться и храниться в приложении. Администратор после решения задачи отправляет оповещение об устранении проблемы пользователю. Также в учетной записи пользователя хранятся личные данные, такие как: Ф.И.О., счет, адрес, тарифы, оплаты и показания счетчиков. Администратор может посмотреть данные пользователя (Ф.И.О., адрес нахождения и прочее), который отправляет заявку, благодаря чему администратор понимает, от кого пришла заявка.

В эту систему можно интегрировать и систему учета энергопотребления каждым пользователем. Новые модели счетчиков электроэнергии, оснащенные модулями связи, передают данные в режиме реального времени, что дает возможность их интеграции в подобную систему.

Л и т е р а т у р а

1. Барретт, Д. Д. Linux. Командная строка. Лучшие практики / Д. Д. Барретт. – СПб. : Питер, 2023. – 256 с.
2. MySQL / Свободная энциклопедия Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MySQL> (дата обращения: 11.04.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ CAN-ШИНЫ И TCP-ПРОТОКОЛА ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ С ДАТЧИКОВ НИЖНЕГО УРОВНЯ И ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЕРЕДАЧИ НА СРЕДНИЙ УРОВЕНЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ SPD

К. А. Плескач, В. А. Дунько, А. Е. Запольский

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

Научные руководители: Ю. В. Крышнев, А. В. Сахарук

Рассмотрены особенности применения протоколов CAN и TCP/IP для сбора и передачи данных от физических датчиков в системах управления ускорительными установками. Приведены примеры реализации на аппаратном и программном уровне, изложены преимущества и недостатки каждого из подходов. Показано, как обеспечивается надежность передачи и синхронизация данных в условиях высоких требований к точности и времени отклика.

Ключевые слова: CAN, TCP/IP, протокол передачи данных, SCADA, датчик, ускоритель NICA, обмен сообщениями.

Современные ускорительные установки и физические комплексы высокого класса, такие как коллайдер NICA в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), предъявляют повышенные требования к системам сбора, передачи и обра-

ботки измерительной информации. Основу телеметрических контуров таких систем составляют разнообразные датчики, регистрирующие физические параметры – от температуры и давления до тока, напряжения и скорости изменения магнитных полей. Для того чтобы эти данные поступали в SCADA-систему в реальном времени и с высокой надежностью, необходимо выбрать подходящие протоколы обмена. В научной и промышленной практике все чаще применяются два типа коммуникационных протоколов: CAN и TCP/IP.

CAN (Controller Area Network) представляет собой помехоустойчивую шину, которая позволяет различным микроконтроллерам и датчикам обмениваться короткими сообщениями. Одним из главных достоинств CAN является высокая надежность при работе в условиях электромагнитных помех. Протокол использует приоритетную передачу сообщений с арбитражем на уровне битов и циклический контроль четности (CRC). Это гарантирует, что даже при высокой нагрузке и помехах наиболее важные сигналы (например, значения аварийных температур) будут переданы в первую очередь.

Длина кадра CAN-сообщения (рис. 1) ограничена 8 байтами полезных данных, что делает его идеальным для передачи параметров, измеренных аналоговыми датчиками. В SCADA-системах CAN может использоваться как первичная линия связи между физическим датчиком и агрегатором или шлюзом. Такой шлюз затем может передавать данные по более высокоуровневому протоколу, например, TCP/IP, на сервер визуализации или хранения. Такой подход обеспечивает распределенную структуру и независимость компонентов [1–3].

В рамках экспериментальной работы был разработан стенд SCADA-системы для установки NICA, в котором реализована поддержка протокола CAN через виртуальный интерфейс `vsap0`. Это позволило протестировать обмен данными между принимающим модулем CAN и серверной частью SCADA без физического оборудования. Данные, полученные по CAN, обрабатывались, преобразовывались в JSON-формат и помещались в очередь для дальнейшей передачи по TCP.

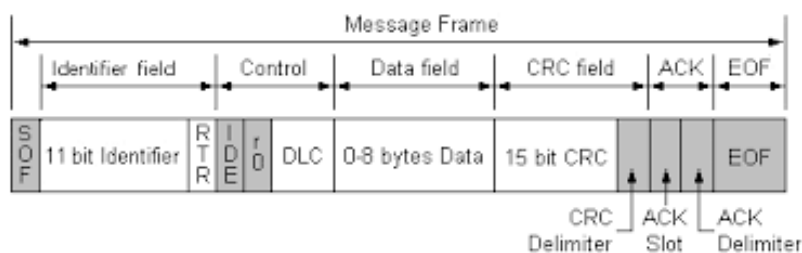


Рис. 1. Схема формата кадра CAN-сообщения

В отличие от CAN, протокол TCP/IP ориентирован на передачу больших объемов данных через компьютерные сети. Он обеспечивает надежную доставку пакетов, контроль целостности и автоматическое восстановление соединения при сбоях. Для SCADA-систем, в которых клиент и сервер расположены на разных машинах, TCP является основным способом доставки данных. Через TCP могут передаваться как текущие значения параметров, так и архивные данные, тревожные сообщения, команды управления и отчеты.

Передача данных по TCP позволяет использовать произвольные форматы сообщений. В проекте использован универсальный формат JSON, который легко интегрируется с языками программирования (C++, Python) и фреймворками визуализации

(например, QML). Применение такого решения позволило реализовать унифицированный обмен между сервером и клиентами как в десктопной, так и в мобильной версии SCADA [3].

Важной задачей при использовании TCP является обеспечение синхронности данных, поступающих от разных источников. Это особенно критично в ускорительных установках, где события происходят с высокой скоростью, а каждый параметр может иметь значение для анализа процесса. Для этого на серверной стороне реализована очередь сообщений с временными метками, а также механизм фильтрации и валидации входящих данных. После проверки сообщения передаются в базу данных и клиентское приложение.

Протоколы CAN и TCP представляют два уровня коммуникации: физический/низкоуровневый и транспортный/прикладной. Они не заменяют друг друга, а дополняют. На практике CAN используется для прямой связи с датчиками в пределах одного сегмента системы, а TCP – для передачи агрегированных или отфильтрованных данных по сети, включая удаленный доступ. Схема передачи данных в системе управления показана на рис. 2.

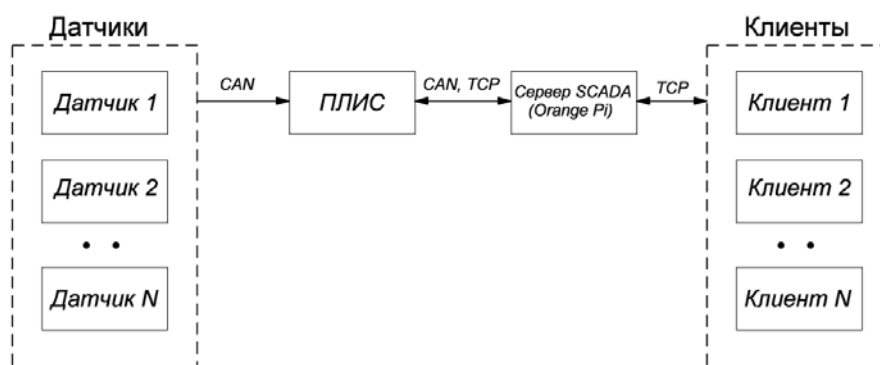


Рис. 2. Схема передачи данных в системе управления

Таким образом, сочетание CAN и TCP в одной системе позволяет выстроить надежную, масштабируемую и отказоустойчивую инфраструктуру мониторинга. В условиях ускорительных установок, где приоритетными являются стабильность и точность, такая архитектура оправдана и дает высокую степень адаптивности к расширению оборудования.

Полученные в ходе реализации результаты демонстрируют, что протоколы передачи данных при рациональном применении могут повышать эффективность решения задач научного мониторинга и управления.

Литература

1. CANopen Overview / CAN in Automation. – URL: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/canopen/> (дата обращения: 28.02.2025).
2. ISO 11898:2023 – Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signaling. – URL: <https://www.iso.org/standard/86384.html> (дата обращения: 01.03.2025).
3. Введение в CAN-протокол / Marathon Technologies. – URL: <http://can.marathon.ru/page/can-protocols/canbus/canintro> (дата обращения: 01.03.2025).
4. Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b/ – URL: https://www.modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf (дата обращения: 05.03.2025).

АСАБЛІВАСЦІ РАСПРАЦОЎКІ МЕТАДУ КАДАВАННЯ ІНТАНАЦЫЙНЫХ КОНТУРАЎ У АНГЛІЙСКОЙ МОВЕ

С. А. Дзмітрук, А. Я. Запольскі

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны
ўніверсітэт імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

С. Ю. Крышнеў

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт
імя Францыска Скарыны», Рэспубліка Беларусь*

Навуковыя кіраўнікі: Ю. В. Крышнеў, М. У. Буракова

Апісаны асаблівасці распрацоўкі метаду кадавання інтанацыйных контураў у англійскай гаворцы з выкарыстаннем асноўных супрасегментных выразных сродкаў (змена гучнасці, змена частаты, змена працягласці).

Ключавыя словы: інтанацыйны контур, кадаванне, аналіз інтанацыі, англійская мова, фанетычная сістэма, фанема, прасадыхныя элементы, паслядоўнасць алічбаваных інтанацыйных табулатур, гучнасць, зрух частаты, працягласць, лінгвістычныя даследаванні.

Англійская мова, адна з самых распаўсюджаных і ўплывовых моў свету, займае асаблівае месца ў глабальнай камунікацыі, адукацыі, навуцы і культуры. Гэта родная мова для больш чым 400 мільёнаў чалавек і другая мова для яшчэ большай колькасці людзей, якая служыць універсальным інструментам для міжнароднага ўзаемадзеяння.

Дадзеная мова бярэ сваё паходжанне з германскай групы індаеўрапейскай моўнай сям'і. Яна эвалюцыянавала на працягу стагоддзяў, уабраўшы ў сябе элементы кельцкіх, лацінскіх, скандынаўскіх і французскіх уплываў, што зрабіла яе багатай і разнастайнай па фанетычных, лексічных і граматычных асаблівасцях.

Брытанскае нарматыўнае вымаўленне (Received Pronunciation, RP) і агульнаамерыканскі варыянт (General American) з'яўляюцца найбольш вывучанымі формамі, аднак дыялекты, такія як аўстралійская, канадская і індыйская англійская, дадаюць унікальныя рысы, якія адлюстроўваюць рэгіянальныя і культурныя асаблівасці.

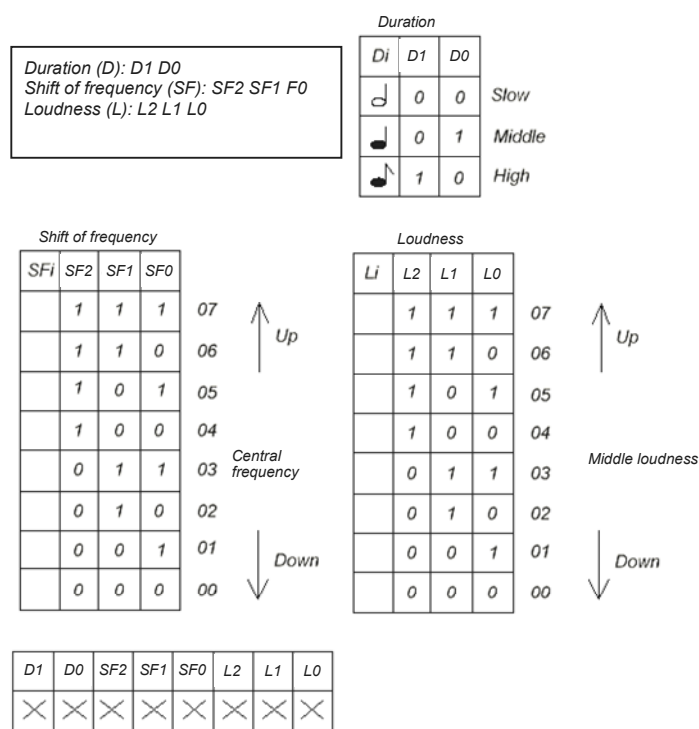
Фанетычная сістэма англійскай мовы, з яе 44 фанемамі (уключаючы 20 галосных і 24 зычных у RP), уяўляе складаны набор сегментных і супрасегментных (прасадыхных) элементаў, такіх як інтанацыя, націск і рытм, якія граюць ключавую ролю ў перадачы сэнсу. Вывучэнне гэтых аспектаў асабліва важна ў кантэксце аўтаматызаваных сістэм апрацоўкі гаворкі, дзе дакладнае распазнаванне і сінтэз гукаў патрабуюць глыбокага разумення алафонаў, фармантных частот і інтанацыйных контураў.

У дадзенай рабоце апісваюцца асаблівасці распрацоўкі метаду кадавання інтанацыі англійскай гаворкі з выкарыстаннем паслядоўнасцяў алічбаваных інтанацыйных табулатур, што адкрывае новыя магчымасці для лінгвістычных даследаванняў і стварэння аўтаномных маўленчых інтэрфейсаў.

Прапанаваны прынцып кадавання інтанацыі выказванняў заснаваны на лічбавым кадаванні прасадыхных табулатур. У класічнай інтэрпрэтацыі табулатура (познелац. *tabulatura*, ад сярэднявеч. лац. *tabula* – табліца, схема) уяўляе сабой тып музычнай натацыі, схематычны запіс музыкі для клавійных (аргана, клавесіна), некаторых струнных (лютні, віўэлы, гітары) і (рэдка) духавых інструментаў. Класічная табулатура аперуе працоўнымі элементамі музычнай прылады (клавішамі,

струнами, ладами). Для скарачэння запісу ў табулатуры прымяняюцца літары, лічбы і спецыяльныя сімвалы. У Еўропе росквіт табулатурнай натацыі прыйшоўся на XVI–XVII стагоддзі. У сучаснай практыцы табулатуры часцяком выкарыстоўваюцца для 6-струнай гітары.

Працэс кадавання інтанацыі пачынаецца з аналізу аўдыёсігнала, дзе ключавыя параметры (гучнасць, зрух частаты і працягласць) здабываюцца з запісаных даных [3, 5, 6]. Гэтыя параметры супастаўляюцца з накіраванымі бітамі, паказанымі ў табліцах. Напрыклад, гучнасць Loudness можа вар’іравацца ад цішыні (000) да максімальна высокай (111), зрух частаты фарманты адносна цэнтральнага значэння Shift of frequency – ад мінімальнай (самай нізкай) частаты (000) да максімальна высокай (111), а працягласць Duration – трыма дыскрэтнымі значэннямі – «павольна» (00), «сярэдне» (01) і «хутка» (10). Кожнае значэнне пакуецца ў агульны 8-бітны код, які затым супастаўляецца з ячэйкамі інтанацыйнай (прасадыхнай) табулатуры (матрыцы 8×8), як паказана на малюнках 1, 2. У залежнасці ад камбінацыі гэтых параметраў у адпаведную ячэйку табліцы запісваецца дыскрэтная нота агульнага меладыхнага малюнку, які ўяўляе сабой алічбаваны элемент інтанацыйнага контура. Спецыфікацыя інфармацыйных палёў для вышэйназваных параметраў прасодыі паказана на мал/ 1.

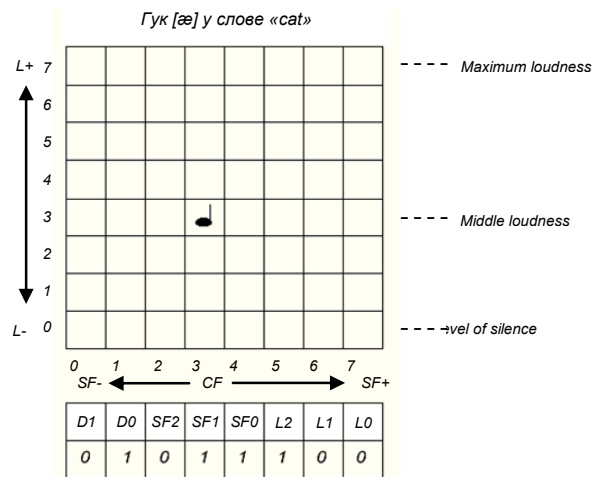


Мал. 1. Прынцып кадавання прасадыхных параметраў маўлення – Працягласць (Duration), Зрух частотнай фарманты (Shift of frequency), Гучнасць (Loudness)

Напрыклад, для галоснага [æ] у слове “cat” гучнасць можа быць сярэдняй (код Loudness = 100), зрух частаты гукавой фарманты – на адну дыскрэту ўніз (код Shift of frequency = 011), а працягласць – сярэдняй (код Duration = 01). Гэтыя біты злучаюцца ў байт і вызначаюць пазіцыю ноты ў інтанацыйнай табулатуры, дзе яна ўсталёўваецца з пазначэннем працягласці (мал. 2).

Такі падыход дазваляе кадзіраваць і сегментныя адзінкі, і прасадныя (фразавыя) сродкі, што важна для дакладнага сінтэзу гаворкі.

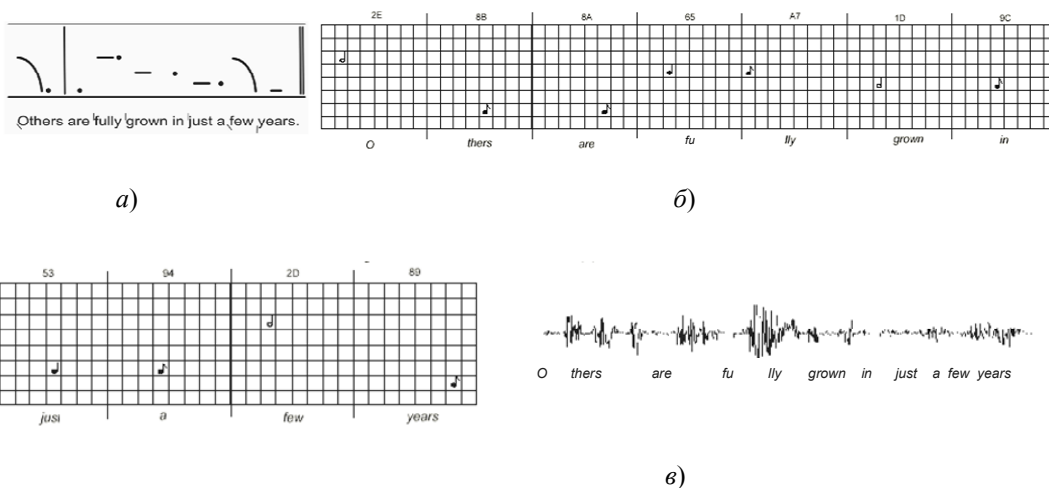
Табулатура ўяўляе сабой матрыцу 8×8 , дзе радкі і слупкі адпавядаюць камбінацыям біт з табліц Duration, Shift of frequency і Loudness. Кожная ячэйка ўтрымоўвае знак ноты ці пустое значэнне, калі ў дадзеным месцы кадуецца паўза (код Loudness = 000).



Мал. 2. Прыклад кадавання гуку “æ” у слове «cat» [kæt]

Разгледзім кадаванне англійскага сказа “Others are fully grown in just a few years”.

Спачатку словы разбіваюцца на фанемы, пасля гэтага кожная фанема заносіцца ў адпаведную адзіную ячэйку інтанацыйнай табулаты памерам 8×8 . У залежнасці ад інтанацыйнага контуру атрымліваем 8-бітны код для кожнай фанемы. Напрыклад, для “O” 8-бітны код будзе 00101110, а для “thers” – 10001011, і г. д.



Мал. 3. Прыклад кадавання інтанацыйнага контуру фразы “Others are fully grown in just a few years”:

a – класічны запіс з абазначэннем танічных сімвалаў, распрацаваных R. Kingdon [2, 4]; б – запіс у выглядзе паслядоўнасці алічбаваных інтанацыйных табулатур; в – часовая форма зарэгістраванага акустычнага сігналу)

Ужыванне разгледжанага метаду кадавання інтанацыйнага контуру дазволіць эфектыўна кадаваць англійскую гаворку з ужываннем сучасных апаратна-праграмных сістэм. Пры гэтым улічваюцца акустыка-фанетычныя асаблівасці мовы.

Эфектыўная апрацоўка натуральнай гаворкі можа з'яўляцца асновай для розных кірункаў, такіх як сістэмы распазнання і сінтэзу гаворкі, вызначэнне эмацыйнай афарбоўкі выказванняў, машынны пераклад з улікам асаблівасцяў інтанацыі.

Літаратура

1. Weiss, Piero; Taruskin, Richard, 2014.
2. Барысава LV, Metlyuk. Theoretical Phonetics. – Minsk, 1980.
3. Карнеўская, А. Б. Практычная фанетыка англійскай мовы на прасунутым этапе навучання: вучэбнік / А. Б. Карнеўская, Я. А. Місурна, Л. Д. Ракаўская ; пад агул. рэд. А. Б. Карнеўскай. – 6-е выд., перараб. – Мінск : Аверсэў, 2017. – 411 с. : іл.
4. Roach, P. English Phonetics and Phonology / P. Roach. – Cambridge, 1990.
5. Рабінер, Л. Р. Тэорыя і прымяненне лічбавай апрацоўкі сігналаў : пер. з англ. / Л. Р. Рабінер, Б. Голд ; пад рэд. Ю. М. Аляксандрава. – М. : Мір, 1978. – 637 с.
6. Айфічэр, Э. Лічбавая апрацоўка сігналаў: практычны падыход / Э. Айфічэр, Б. Джэрвіс. – 2-е выд., 2004. – 992 с.

ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

А. Е. Запольский

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

Научный руководитель Ю. В. Крышнев

Рассмотрены способы совершенствования систем катодной защиты для достижения наиболее совершенной защиты магистральных нефтепроводов от коррозионного поражения, включая применение альтернативных источников питания и каналов связи.

Ключевые слова: системы катодной защиты, магистральные нефтепроводы, антикоррозийная защита, канал связи, альтернативная энергетика, нейронные сети.

Трубопроводный транспорт, включая магистральные нефтепроводы, оказывает стратегическое значение как на экономику, так и на национальную безопасность Республики Беларусь.

Одной из ключевых проблем обслуживания данного вида транспорта является поддержание его текущего состояния с учетом воздействия различных факторов, в главную очередь, защиту от разрушающего воздействия процесса коррозии. Такое воздействие, при длительном периоде времени, может приводить к необратимому разрушению как основных, так и вспомогательных конструкций магистральных нефтепроводов. С учетом этого важным вопросом является организация противокоррозионной защиты с применением как активных, так и пассивных способов.

К активным способам защиты магистральных нефтепроводов относятся катодная (протекторная (гальваническая), электрохимическая) и электродренажная защита.

Главными преимуществами катодной защиты являются: высокая эффективность в отношении электрохимической коррозии, широкая география применения вне зависимости от среды, которая является агрессором (грунт, вода, водно-солевые растворы), возможность симбиоза с современными средствами автоматизации, воз-

можность совместного применения с пассивными способами защиты (изоляционные и ингибиторные покрытия) в составе комплексной защиты [1, 2].

Однако, несмотря на известность и широкую применимость этого способа, он имеет ряд нерешенных проблем: комплексное ухудшение эффекта защиты при повреждении защитных покрытий, необходимость контроля, зависимость от изменяющихся условий окружающей среды, зависимость от энергосистемы (особенно проблематично применение в отдаленных районах), негативное воздействие на близлежащие металлоконструкции при неправильном выборе значения защитного потенциала.

Повышение энергоэффективности может быть достигнуто путем внедрения альтернативных источников энергии для питания станций катодной защиты (СКЗ) – применение солнечной и ветровой энергетики. Однако применение данного способа в Республики Беларусь имеет ряд ограничений, вызванных как географией региона, так и экономическими вложениями на начальном этапе. Так, развитие ветровой энергетики в нашей стране имеет ограничения из-за низкой скорости ветра, связанной с географическим рельефом. Крупнейший ветропарк находится в Новогрудском районе Гродненской области, находящемся на возвышенности. Ограничения по развитию солнечной энергетики вызваны низким, в сравнении с южными странами, уровнем инсоляции и выраженной погодной сезонностью.

Крупнейшая солнечная энергетическая станция находится в Брагинском районе Гомельской области. Но применение альтернативной энергетики для автономизации СКЗ по питанию возможно, так как в решении задачи активной защиты трубопроводов не требуются высокие энергопотребности. А повышение эффективности альтернативного питания можно достигнуть внедрением накопителей энергии и путем сбалансированного распределения таких пунктов питания вдоль защищаемого трубопровода.

Решение проблемы образования локальных участков неполной защиты из-за разрушения защитного покрытия без значительных экономических затрат возможно через поиск оптимального режима работы СКЗ.

Для анализа данных о состоянии изоляции трубопровода, параметров окружающей среды (температура, влажность, химический состав) и тока защитного потенциала, можно применить нейронные сети.

Применение искусственного интеллекта позволит оперативно обрабатывать большой поток данных, что, в свою очередь, повышает автоматизацию и автономизацию станций катодной защиты.

На основе полученной информации становится возможным проведение процедур прогнозирования возможных поломок и авторегулирования параметров работы станций катодной защиты.

Выбор режима работы СКЗ и задание оптимального защитного потенциала являются стратегическими факторами, которые позволят повысить уровень защиты от коррозионного поражения с оптимизацией энергопотребления системы.

Нейронные сети, на основе данных о распределении токов распределения электрического поля вдоль трассы трубопровода, могут анализировать состояние изоляции.

Применение подобной интеллектуальной системы позволит оценить состояние изоляционного покрытия защищаемого трубопровода, оптимизировать планирование своевременных профилактических мероприятий по текущему ремонту и обслуживанию, что, в свою очередь, позволит снизить риск аварийных ситуаций, и вызванные этим нежелательные экономические потери.

Для прогнозирования отказов работы основных элементов СКЗ на основе исторических данных можно применять нейронные сети типа LSTM (длинная цепь элементов краткосрочной памяти) или CNN (сверточная нейронная сеть). Глубокое машинное обучение применимо для управления параметрами защиты.

Важным вопросом организации работы современных СКЗ является дистанционный обмен данными. Современные контрольно-измерительные пункты станций катодной защиты имеют возможность организации телеметрии с использованием стандарта 4G LTE.

Однако данный вид подвижной радиосвязи зависит от инфраструктуры, необходимой для ее функционирования. Для организации вспомогательного (аварийного) канала можно использовать коротковолновую (КВ) цифровую радиосвязь, что позволит реализовать передачу данных на значительные расстояния в условиях полной независимости от существующей инфраструктуры сотовой связи.

Совершенствование текущих станций катодной защиты магистральных нефтепроводов заключается в повышении их уровня энергоэффективности и автономности. Повышение данных критериев возможно за счет совершенствования их конструкции, применения новейших информационных технологий и альтернативных источников энергии.

Литература

1. Аналіз умов утворення карозії підземних трубопроводів і методів її протидії / Ю. В. Крышней, А. Я. Запольскі, М. А. Рогаў, Ю. Я. Котава // 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 ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 218–221.
2. Умови формування аномального току в системах електрифікованої лінії / Ю. В. Крышней [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.

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДИСПЛЕЯ В МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

В. А. Михайлов

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

Научный руководитель Э. М. Виноградов

Рассмотрены особенности применения современных жидкокристаллических дисплеев для организации индикации в микроконтроллерных измерительных приборах.

Ключевые слова: графический дисплей, жидкокристаллический дисплей, микроконтроллер, измерительный прибор.

Графические жидкокристаллические дисплеи (ГЖКД), или по-английски GLCD (Graphical Liquid Crystal Display), представляют собой недорогие и удобные модули, позволяющие сэкономить время и ресурсы при разработке новых изделий, при этом обеспечивающие отображение большого объема информации при хорошей различимости и низком энергопотреблении.

Для управления такими средствами индикации необходимы специализированные микросхемы. Например, Samsung KS0108. Этот контроллер определил интерфейс, который стал стандартом «де-факто» для графических ЖКД.

Дисплеи с таким интерфейсом можно встретить в самых разнообразных устройствах: измерительных приборах, медицинском оборудовании, промышленном и технологическом оборудовании.

Важнейшей задачей при проектировании микроконтроллерной системы является выбор средства разработки. В настоящее время самым мощным средством разработки программного обеспечения для микроконтроллеров являются интегрированные среды разработки IDE (Integrated Development Environment), имеющие в своем составе текстовый редактор, компилятор языков высокого уровня, отладчик-симулятор, а также библиотеки готовых функций.

Одним из таких программных инструментов является среда разработки mikroC компании MikroElektronika. Данная среда разработки позволяет быстро создавать эффективные программы на распространенном языке высокого уровня C. Среда имеет удобный интерфейс пользователя со встроенным редактором текста и мощным отладчиком программ. Встроенный мастер проектов позволяет в считанные минуты создать заготовку рабочей программы для любого микроконтроллера из целого семейства. Библиотека готовых функций обеспечивает пользователя поддержкой для быстрого и безошибочного создания программы. Компания MikroElektronika создала среду разработки mikroC PRO for PIC для PIC-микроконтроллеров компании Microchip. С целью облегчения разработки программ в интегрированной среде mikroC PRO for PIC имеются библиотечные функции для управления графическим ЖКД на основе контроллера KS0108 [1, 2]. Рассмотрим эти функции.

Glcd_Init() – функция инициализирует модуль GLCD. Линии управления и данных GLCD могут настраиваются пользователем, но восемь линий данных должны быть на одном порту. До вызова функции инициализации интерфейс между GLCD и микроконтроллером должен определяется с помощью операторов типа sbit ... at.

Glcd_Fill() – функция используется для очистки GLCD.

Glcd_Dot() – рисует точку на GLCD.

Glcd_Write_Char() – функция отображает символ на GLCD.

Glcd_Write_Text() – функция отображает текст на GLCD.

Glcd_Set_Font() – выбирает шрифт.

Glcd_V_Line() – рисует горизонтальную ось координат.

Glcd_H_Line() – рисует вертикальную ось координат.

В статье рассматривается микроконтроллерный измеритель метеорологических параметров (атмосферное давление, температура и высота над уровнем моря). Принципиальная электрическая схема измерителя представлена на рис. 1.

В качестве датчика метеопараметров используется микросхема LPS331AP, присоединённая к микроконтроллеру PIC18F4550 с помощью интерфейса I2C. ГЖКД выполнен на микросхеме AMPIRE с форматом дисплея 128 × 64. Она подключена к портам микроконтроллера PORTB и PORTD. Для синхронизации используется кварцевый резонатор с частотой 8 МГц, но включена система умножения частоты ФАПЧ, так что фактическая рабочая тактовая частота составляет 32 МГц.

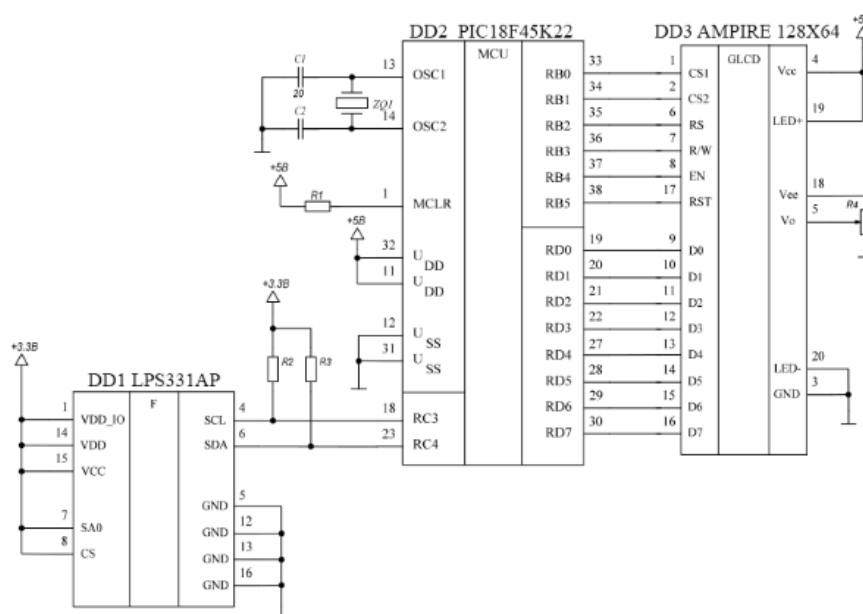


Рис. 1. Схема измерителя метеорологических параметров с графическим ЖКД

В начале программы определяются соединения ГЖКД с микроконтроллером, имена регистров и адреса микросхемы LPS331AP. Модуль ГЖКД инициализируется и экран очищается. Затем программа инициализирует микросхему LPS331AP для работы с интерфейсом I2C. Остальная часть программы выполняется в бесконечном цикле. В нем с датчика считываются давление и температура, рассчитывается высота, и все три параметра отображаются на экране ГЖКД. Этот процесс повторяется каждые 5 с.

В программе используются следующие функции.

Init_Pressure – инициализация микросхемы датчика.

Pressure_Write – записывает байт в микросхему датчика.

Pressure_Read – читает байт из микросхемы датчика.

Read_Pressure_Value – посылает импульс в микросхему датчика для запуска процесса измерения. Читает код давления и возвращает его в вызывающую программу.

Read_Temperature_Value – читает код температуры, преобразует его в градусы Цельсия и возвращает в вызывающую программу.

Read_Altitude_Value – преобразует измеренное давление в значение высоты над уровнем моря.

Display_PTA – отображает на экране ГЖКД давление, температуру и высоту.

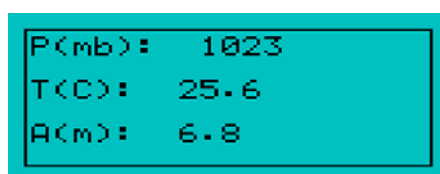


Рис. 2. Отображение измеренных метеопараметров на экране ГЖКД

На рис. 2 приведен скриншот экрана графического ЖКД с измеренными метеопараметрами.

Литература

1. Шпак, Ю. А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров / Ю. А. Шпак. – К. : МК-Пресс ; СПб. : КОРОНА-БЕК, 2011.
2. MikroC PRO for PIC. User's manual. – 2014. – URL: <http://www.mikroe.com>.

**РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНОГО
ПРОТОКОЛА ZIGBEE**

А. А. Лупарев

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

Научные руководители: В. А. Карпов, Ю. В. Крышнев, А. Е. Запольский

Отражены особенности разработки автономных датчиков температуры, влажности и давления с беспроводным протоколом Zigbee для применения в сварочном регистраторе.

Ключевые слова: Zigbee, ESP32-H2, термодатчик, датчик влажности, датчик давления, REF200, ADS1118, термистор, измерение температуры сварки, автономный датчик, калибровка, энергоэффективность, регистрация данных.

Системы регистрации технологических параметров при сварочных работах требуют непрерывного контроля температуры шва, влажности и давления для соблюдения технологии. Применение автономных беспроводных датчиков на Zigbee позволяет отказаться от проводных подключений, снизить влияние человеческого фактора и повысить точность измерений за счет близкого расположения датчиков к точке сварки [1].

Основной целью работы являлась разработка системы из Zigbee-датчиков, способной измерять температуру в диапазоне от минус 40 °С до плюс 500 °С, влажность и атмосферное давление, с последующей передачей данных в реальном времени на координатор сварочного регистратора. Для выполнения задачи использовались микроконтроллерное устройство ESP32-H2 с поддержкой Zigbee, малошумящие аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADS1118, источники тока REF200 и прецизионные термисторы [2–4].

Для построения экспериментальной установки были разработан макет, включающий термодатчики с выносными термисторами, источник опорного тока и делитель напряжения для измерения напряжения аккумулятора. В качестве источника питания использовались литиевые аккумуляторы. На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема термодатчика.

Процесс измерений показателей включает в себя собственно измерение и передачу данных с применением беспроводного протокола Zigbee на координатор, подключённый к регистратору по интерфейсу UART. Датчики температуры, влажности и давления производят циклическое измерение параметров с интервалом в 3 с, что позволяет отслеживать изменения технологических параметров в процессе сварки и термообработки изделий.

Сигналы с термисторов поступают на АЦП ADS1118, обеспечивая стабильную дискретизацию и достаточную точность для сварочных работ.

Для контроля питания датчиков использовались делители напряжения, значения напряжения с них передавались по протоколу Zigbee, что позволяло своевременно отслеживать заряд аккумуляторов и планировать их замену или подзарядку.

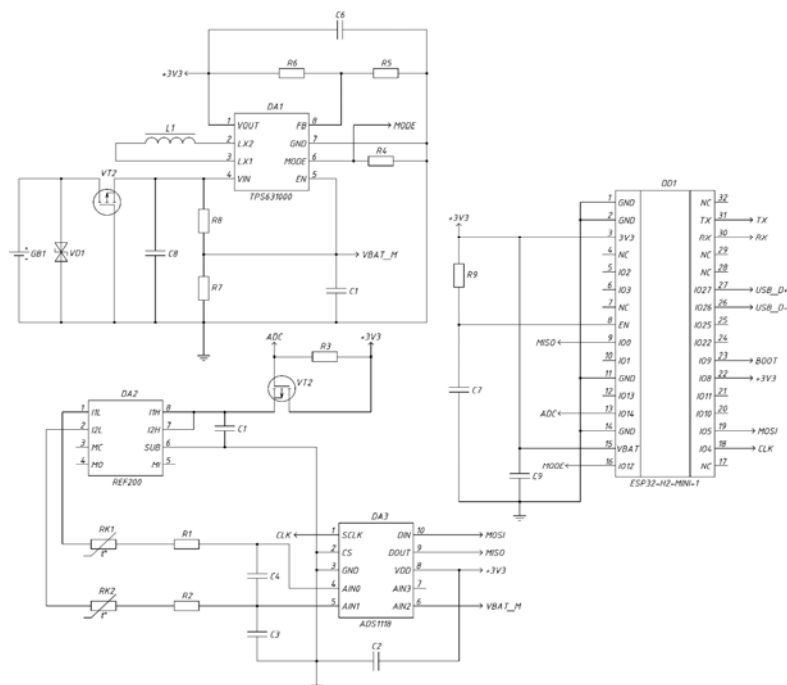


Рис. 1. Принципиальная схема Zigbee-термоматчика

На рис. 2 представлена структурная схема взаимодействия датчиков с координатором и промышленным компьютером.

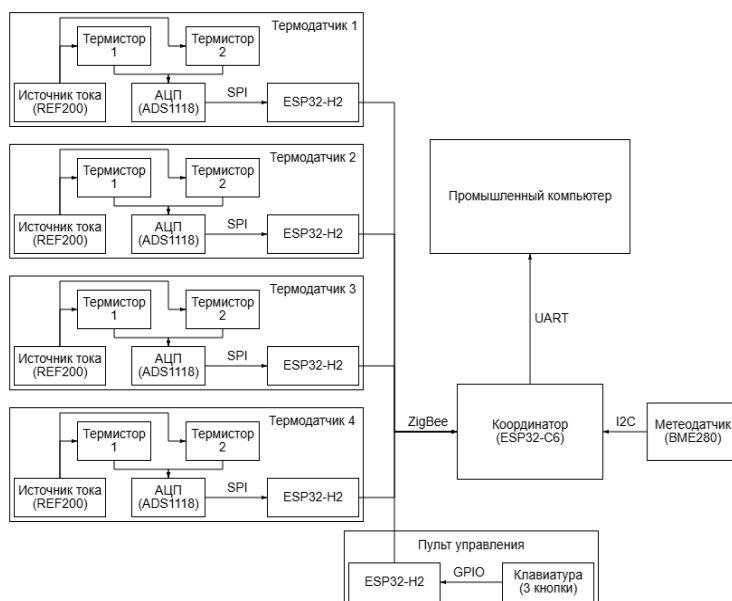


Рис. 2. Структурная схема системы с Zigbee-датчиками

В ходе испытаний датчиков была подтверждена стабильность работы системы при различных температурных условиях, в том числе при температурах выше 200 °С. Погрешность измерения температуры составила не более 0,5 °С в диапазоне от 0 до 100 °С и около 1 °С в диапазоне до 500 °С, что соответствует требованиям к измерениям при сварке и термообработке.

Для анализа качества связи использовались встроенные функции стека Zigbee, позволяющие оценивать уровень сигнала, стабильность пакетов и отклики от координатора. Формирование пакетов в сети Zigbee происходило с добавлением идентификаторов кластера, ID устройства, ID атрибута и значения измеряемого параметра, что позволило легко различать данные с разных датчиков в системе регистрации [5].

На рис. 3 показан пример отображения данных датчиков в систему регистратора сварки, где видно распределение измерений по времени и устройствам.

```
I (4596) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(20) достигнутый эндпоинт(1)
кластер(0xb04)
I (4606) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(21) достигнутый эндпоинт(2)
кластер(0xb04)
I (4626) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0x402)
I (4636) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0xb04)
I (4656) UART: TS:1010;33;72;54;0;4051;1
I (9556) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(20) достигнутый эндпоинт(1)
кластер(0xb04)
I (9566) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(21) достигнутый эндпоинт(2)
кластер(0xb04)
I (9576) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0x402)
I (9586) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0xb04)
I (9606) UART: TS:1010;32;76;86;0;4050;1
I (10826) BME280: Температура: 25.88 °C
I (10826) BME280: Влажность: 45.77 %
I (10826) BME280: Атмосферное давление: 995.47 гПа
I (10826) UART: MS:25.9;45.8;995.5
I (14566) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(20) достигнутый эндпоинт(1)
кластер(0xb04)
I (14576) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(21) достигнутый эндпоинт(2)
кластер(0xb04)
I (14586) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0x402)
I (14606) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0xb04)
I (14616) UART: TS:1010;32;91;60;0;4055;1
```

Рис. 3. Пример отображения данных с датчиков в системе регистратора

Расчеты энергопотребления показали, что в спящем режиме потребление датчиков составляло порядка 15–20 мкА, а в активном режиме с передачей данных – до 20–25 мА, что позволяет устройствам работать автономно от аккумулятора емкостью 350 мА · ч в течение от 5 до 7 суток без подзарядки.

В результате работы была подтверждена работоспособность и точность датчиков с применением Zigbee в условиях сварочных работ. Система обеспечивает удобство развёртывания, точность и надежность беспроводных измерений без необходимости постоянного участия оператора, а также легкость интеграции в существующие сварочные регистраторы.

Л и т е р а т у р а

1. Espressif Systems. – URL: <https://espressif.com/> (дата обращения: 22.06.2025).
2. ESP32-H2 Datasheet. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата обращения: 22.06.2025).
3. ADS1118 Datasheet. – URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/ADS1118/> (дата обращения: 22.06.2025).
4. REF200 Datasheet. – URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/REF200/> (дата обращения: 22.06.2025).
5. ZigBee Cluster Library. – URL: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/12/07-5123-06-zigbee-cluster-library-specification.pdf> (дата обращения: 22.06.2025).

ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗНЫХ ТИПОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ РАДИАЦИИ

А. А. Лупарев

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

Научные руководители: Ю. В. Крышнев, В. Г. Кручонок, А. Е. Запольский

Измерены основные характеристики детекторов радиации из кремния, арсенида галлия и кадмий-цинк-теллурида.

Ключевые слова: полупроводниковый детектор, радиация, амплитуда сигнала, длительность сигнала, подвижность, время жизни носителей заряда, светодиодный генератор, осциллограф, ROOT CERN, преобразование Хехта.

Все измерительные системы в радиационной и ядерной физике используют различные виды детекторов, позволяющих фиксировать параметры излучения. Среди них полупроводниковые детекторы (Si, GaAs, CdZnTe), широко применяемые благодаря высокой чувствительности к частицам и фотонам, что позволяет точно определять характеристики излучения для физики частиц, медицинской диагностики и мониторинга среды.

Полупроводниковые детекторы преобразуют взаимодействие излучения с материалом в электрический сигнал, параметры которого (амплитуда, длительность, форма) зависят от характеристик носителей заряда и примененного электрического поля.

Основной целью исследования являлось измерение амплитуды и длительности сигналов, возникающих в полупроводниковых детекторах при воздействии световых импульсов, для дальнейшего расчета подвижности и времени жизни носителей заряда в материале детектора. Для выполнения поставленных задач необходима экспериментальная установка, производство сбора и анализа данных с применением цифрового осциллографа и специализированного программного обеспечения ROOT CERN [1].

Все практические исследования характеристик полупроводниковых детекторов требуют построения установки, позволяющей фиксировать параметры сигналов при воздействии на детектор контролируемыми импульсами. В данной работе была собрана схема с MOSFET-ключом, ограничительным резистором и светодиодом, позволяющая генерировать световые импульсы частотой 25 Гц и длительностью 100 нс. Напряжение источника питания составляло 11,7 В, сопротивление резистора – 5 Ом. Схема установки представлена на рис. 1.

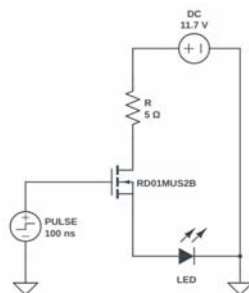


Рис. 1. Схема установки для исследования детектора

Для измерений использовался осциллограф, фиксирующий отклик детекторов GaAs, Si и CdZnTe на световые импульсы. При подаче смещающего напряжения на детектор и его освещении светодиодом измерялись амплитуда, длительность и задержка сигнала относительно импульса генератора. Измерения проводились при пошаговом увеличении напряжения до момента насыщения, когда дальнейший рост напряжения не влиял на форму сигнала, что позволяло оценить работу детектора в линейном и насыщенном режимах. На рис. 2 показана осциллограмма сигналов: зеленым – импульс генератора, желтым – сигнал с детектора при приложенном напряжении.

В процессе эксперимента данные систематически записывались для последующего анализа. Амплитуда сигнала росла с ростом приложенного напряжения, а длительность импульса сокращалась до насыщения. Это позволило оценить динамические характеристики детекторов, необходимые для расчета подвижности и времени жизни носителей заряда.

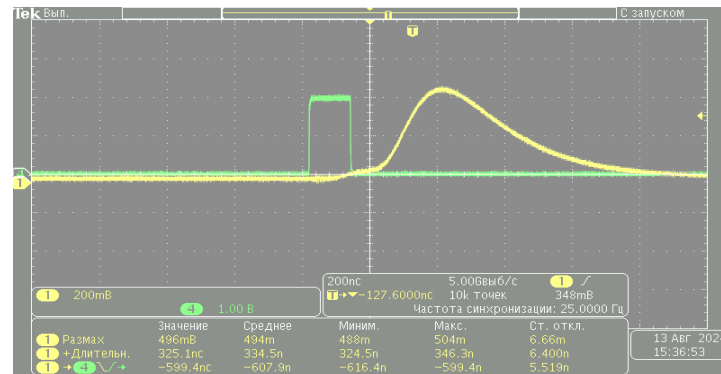


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с детектора и генератора

После завершения экспериментов данные были обработаны в специализированном программном обеспечении (ПО) ROOT CERN, где производилась подгонка экспериментальных кривых для расчета характеристик материала детектора. Эти данные легли в основу анализа работы полупроводниковых детекторов под действием световых импульсов в условиях контролируемого эксперимента.

Для анализа характеристик полупроводниковых детекторов были построены графики зависимости амплитуды и длительности сигналов от приложенного напряжения, с помощью ROOT CERN, с последующим фитированием по уравнению Хехта (1) [2]:

$$CCE = \frac{\mu\tau U}{d^2} \left(1 - e^{-\frac{d^2}{\mu\tau U}} \right), \quad (1)$$

где μ – подвижность носителей заряда, $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$; τ – время жизни, с; U – напряжение, В; d – толщина детектора, см.

Для определения μ использовалась зависимость (2):

$$t = \frac{d^2}{\mu U}, \quad (2)$$

где t – время, измеренное по длительности сигнала.

Фитирование выполнялось в ROOT CERN, после чего подвижность и время жизни вычислялись по параметрам фитированных кривых [3].

Пример графика длительности и сигнала с фитами приведен на рис. 3.

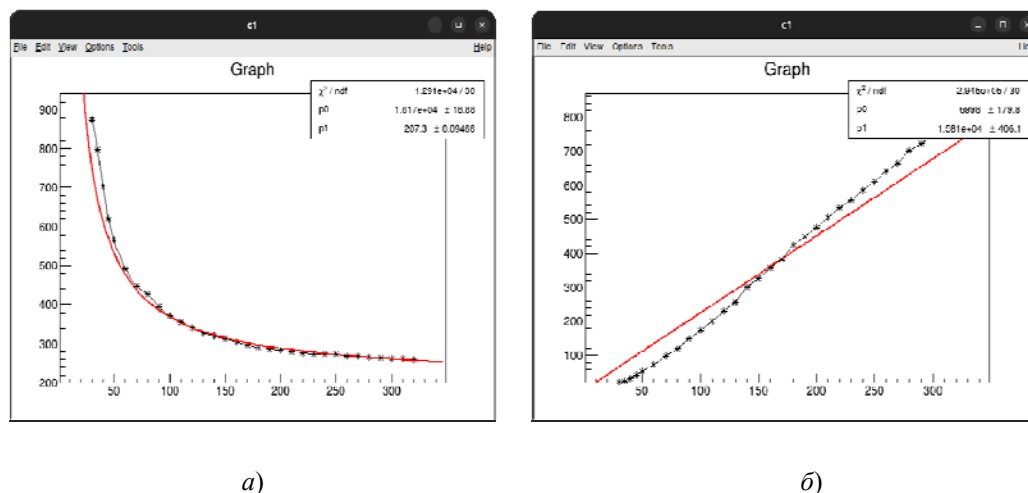


Рис. 3. Фитирование в ROOT CERN:
а – по длительности сигнала; б – по амплитуде сигнала

Для детектора CdZnTe (толщина 900 мкм) расчеты показали подвижность $\mu = 500,9 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ и время жизни $\tau = 2,31 \text{ нс}$. Аналогичные расчеты проведены для GaAs и Si. Результаты изложены в таблице.

Результаты расчета подвижности и времени жизни носителей заряда

Детектор	Подвижность μ , $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$	Время жизни τ , нс
GaAs	9920	4,4
Si (e)	649	17
Si (h)	633	19
Si (h, Am241)	601	183
CdZnTe	501	2,3

Полученные данные показывают различия в характеристиках материалов: GaAs обладает высокой подвижностью и малым временем жизни, Si имеет более низкую подвижность при большем времени жизни, а CdZnTe демонстрирует минимальные значения по обоим параметрам. Эти результаты важны для выбора детекторов в практических приложениях, требующих высокой скорости отклика или длительного времени жизни носителей.

Литература

1. Учебное пособие по ROOT от CERN. – URL: <https://root.cern.ch/root/html/doc/guides/users-guide/ROOTUsersGuideA4.pdf/> (дата обращения: 26.06.2025).
2. Акимов, Ю. К. Полупроводниковые детекторы радиоактивного излучения : учеб.- метод. пособие / Ю. К. Акимов. – Дубна : ОИЯИ, 2009. – 277 с.
3. Фитирование в ROOT CERN. – URL: https://root.cern/doc/master/group__tutorial__fit.html/ (дата обращения: 26.06.2025).

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ДАТЧИКА НАГРУЗКИ И АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМОГРАММ УСТАНОВОК ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ

М. А. Проскуряков, А. В. Федорович

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

Научные руководители: Ю. В. Крышнев, О. В. Лымарь, А. Е. Запольский

Рассмотрен процесс обработки сигналов с датчика нагрузки и акселерометра для построения поверхностных динамограмм.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, динамограмма, штанговый глубинный насос, датчик нагрузки, акселерометр, быстрое преобразование Фурье.

Динамограмма штангового глубинного насоса (ДГ ШГН) отражает зависимость нагрузки в точке подвеса штанг от положения полированного штока, которая дает информацию о состоянии глубинного оборудования скважины [1].

Для измерения нагрузки и положения полированного штока установки ШГН используется датчик EMS-122. Принцип работы датчика основан на действии моста тензорезисторов, меняющего сопротивление в зависимости от приложенной нагрузки и на вычислении положения полированного штока на основании данных акселерометра [2].

Таким образом, перемещение полированного штока определяется косвенным методом по его ускорению. Современные датчики ускорения и поворота промышленного применения, как правило, имеют достаточно большую погрешность и дрейф, что требует применения сложных алгоритмов обработки данных. Наиболее просто задача решается при расположении акселерометра на балансире, что позволяет достаточно точно определить его положение относительно вектора силы тяжести. При расположении же датчика на траверсе положение полированного штока определяется двойным интегрированием, что приводит к накоплению недопустимой ошибки уже при первом качании. Поэтому для построения ДГ требуется иной подход.

Ход полированного штока в идеале повторяет гармонические колебания. Это связано с тем, что вращение кривошипа станка-качалки, фактически, соответствует развертке по времени вертикальной проекции вращающегося вектора, и описывается синусоидой (рис. 1).

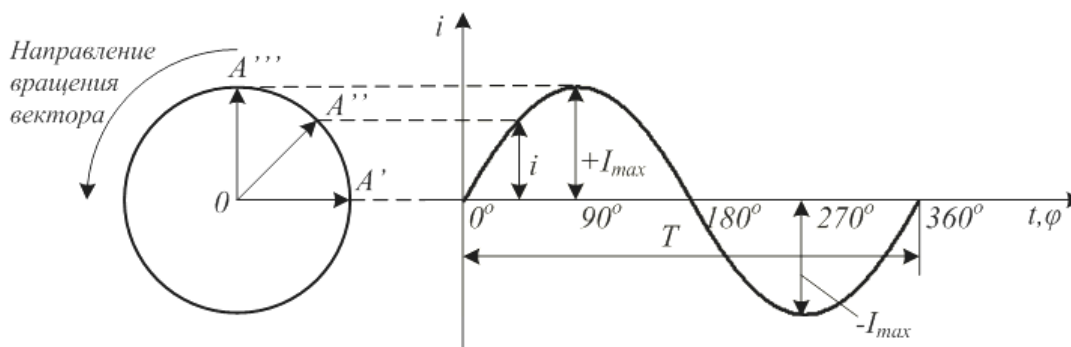


Рис. 1. Развертка по времени вращающегося вектора тока

Это позволяет уйти от необходимости двойного интегрирования данных акселерометра и возникающих при этом проблем. Так как движение полированного штока аппроксимируется синусоидой, то основной задачей становится найти период колебаний и фазу для синхронизации данных с датчиком нагрузки.

Для точного определения периода колебаний необходима достаточно большая по времени выборка значений, что неприемлемо в данном случае, так как теряется разрешение во временной области. Одновременно с этим, при небольшой по времени выборке снижается точность определения периода колебаний. Для определения периода колебаний наиболее подходит метод быстрого преобразования Фурье (БПФ). С целью увеличения разрешающей способности по частоте при БПФ (фактически, интерполяции) можно воспользоваться методом дополнения нулями исходной анализируемой последовательности [3].

Перед применением алгоритмов БПФ из сигнала необходимо исключить постоянную составляющую, отфильтровать скользящим средним и наложить окно Хемминга.

Для определения постоянной составляющей в сигнале, ищется его среднее значение на большом отрезке времени, что снижает погрешность от попадания нецелого количества периодов колебаний в анализируемое окно.

На рис. 2 приведены сигналы с датчика нагрузки (верхний), акселерометра (средний) и обработанный сигнал акселерометра после исключения постоянной составляющей и сглаживания скользящим средним окном (нижний).

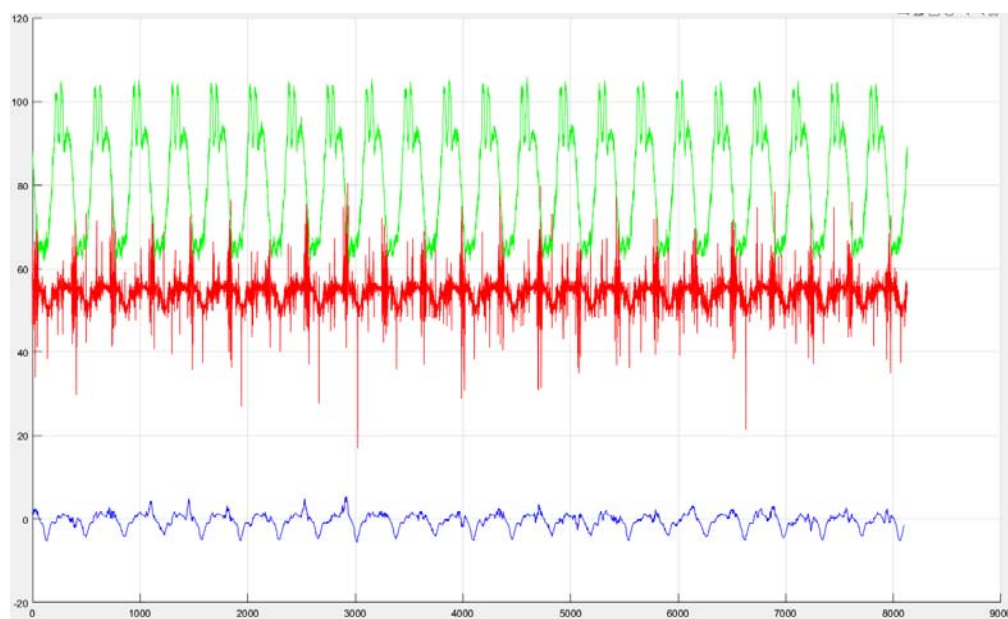


Рис. 2. Сигналы датчика нагрузки и акселерометра

Изменение фазы сигнала акселерометра приведено на рис. 3. Так как функция тангенса имеет разрывы второго рода, то ее применение для определения фазы нецелесообразно. Здесь необходимо применять непрерывные функции: синуса или косинуса.

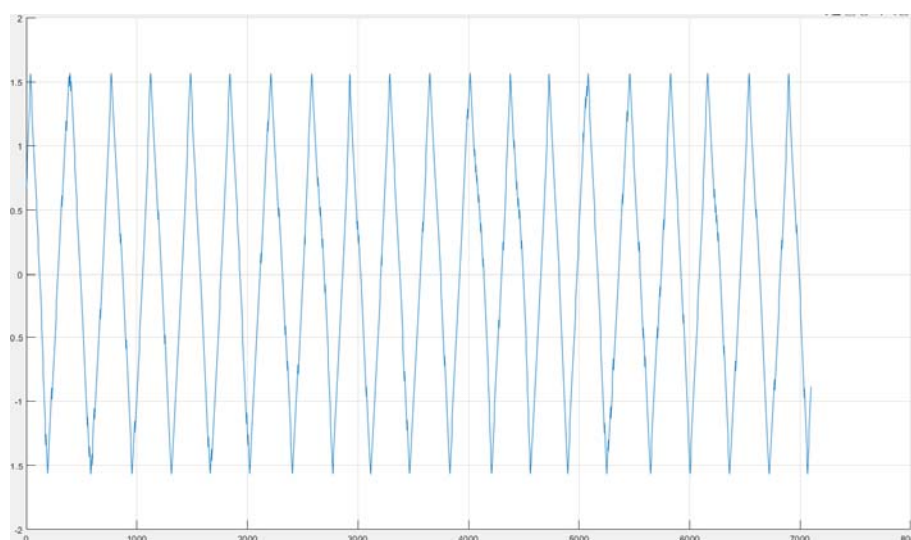


Рис. 3. Изменение фазы сигнала

Как уже отмечалось выше, ДГ строится по данным датчика нагрузки и аппроксимированной синусом функции перемещения (с соответствующей синхронизацией их по фазе). На рис. 4 приведена подобная ДГ, амплитуда перемещения полированного штока задана 125 см.

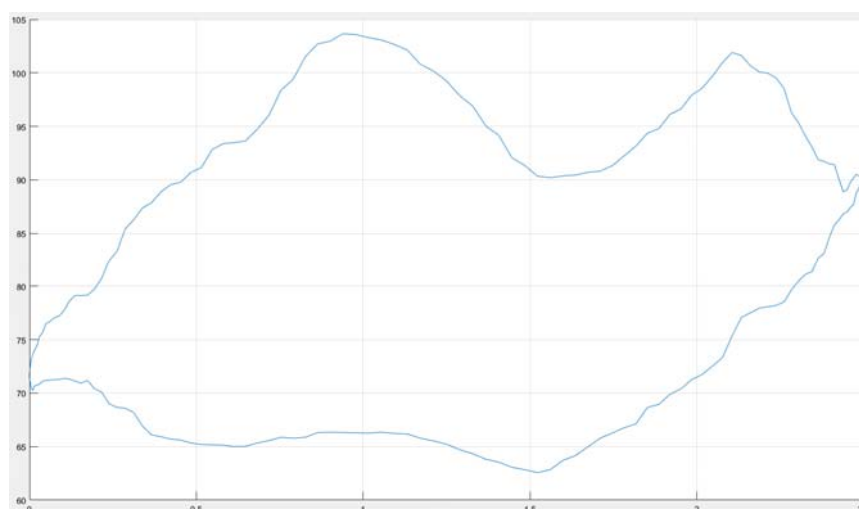


Рис. 4. Построенная ДГ установки ШГН

Литература

1. Бубнов, М. В. Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов / М. В. Бубнов, А. М. Зюзев // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института, Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. – Екатеринбург : УрФУ, 2016.
2. Датчик нагрузки и положения EMS122. – URL: <https://www.naftamatika.com/ru/products-and-services/7> (дата обращения: 02.07.2025).
3. Простыми словами о преобразовании Фурье. – URL: <https://habr.com/ru/articles/196374/> (дата обращения: 02.07.2025).

МЕТАЛЛОДЕТЕКТОР ДЛЯ КОРМО- И ЗЕРНОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ

В. В. Змиевский, Е. Д. Цыкунов

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

Научные руководители: В. А. Карпов, Л. А. Захаренко, А. Е. Запольский

Рассмотрено применение аналогового и цифрового методов обработки сигналов трансформаторного металлодетектора.

Ключевые слова: металлодетектор, измерительный преобразователь, электронный блок обработки сигналов, электромагнитный датчик, кормоуборочная техника, микроконтроллер, цифровая обработка сигналов.

Аналоговая обработка сигнала с металлодетектора производится с помощью измерительного преобразователя [1].

Одним из этапов подготовки к выделению полезного сигнала с детекторной обмотки датчика является вычитание из него синфазного синусоидального сигнала с такой же амплитудой, как и у сигнала с детекторной обмотки. Синфазный синусоидальный сигнал можно взять сразу после усилителя мощности, а для качественной корректировки скомпенсированного сигнала на схему компенсации должен приходить сигнал с наименьшим количеством шумов и минимальным дрейфом по амплитуде.

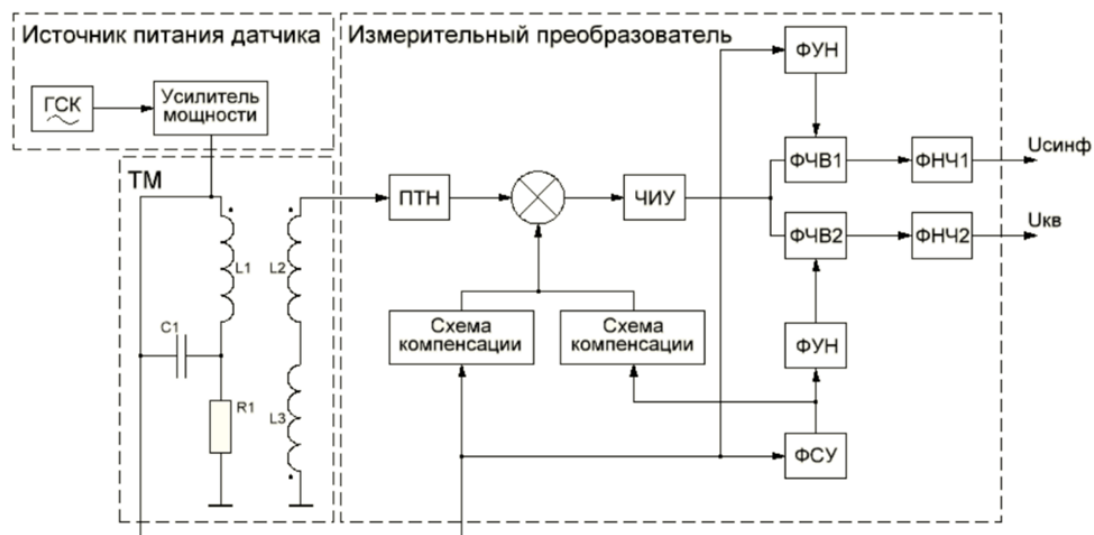


Рис. 1. Структурная схема измерительного преобразователя металлодетектора

С помощью частотно-избирательного усилителя (ЧИУ) выделяется и усиливается гармоника полезного сигнала. После этого сигнал поступает на фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), где в зависимости от фазы управляющего сигнала выделяет синфазную составляющую, при реакции на ферромагнетик, или, квадратурную составляющую, при реакции на диамагнетик. Фильтр низших частот (ФНЧ) отсеивает помехи и пропускает первую гармонику полезного сигнала.

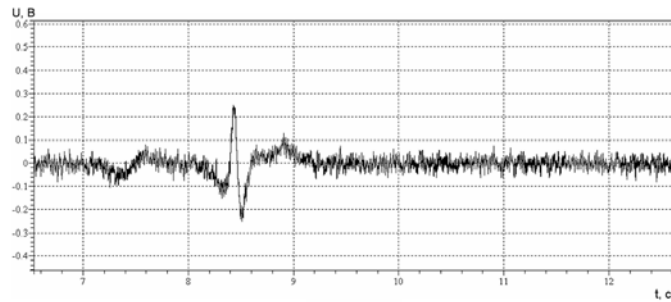


Рис. 2. Реакция на детектирование ферромагнетика (выход с ФЧВ)

Цифровая обработка сигнала с металлодетектора производится с помощью цифро-аналоговой схемы [4].

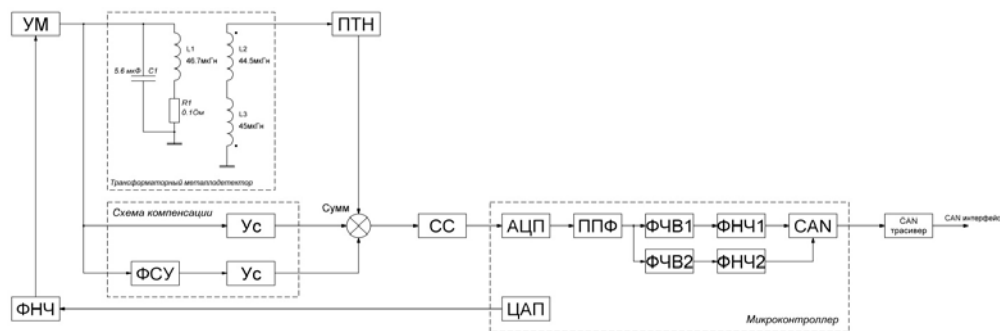


Рис. 3. Структурная схема блока обработки сигналов датчика металлодетектора

Микроконтроллер с помощью ЦАП (в данном случае – ШИМ-модуляции) и ФНЧ формирует синусоидальный сигнал, после чего сигнал смещается и усиливается. Выходным сигналом усилителя мощности (УМ) питается возбуждающая катушка металлодетектора. К выходу встречно включенных сигнальных обмоток подключен преобразователь напряжение-ток (ПНТ). Сигнал с выхода ПНТ суммируется с сигналами схемы компенсации и подается на вход схемы сдвига (СС), которая приводит выходной сигнал сумматора к типовым значениям 0–3,3 В, необходимых для корректной работы АЦП микроконтроллера. АЦП с частотой дискретизации 100 кГц формирует отсчеты. Далее эти отсчеты обрабатываются полосно-пропускающим фильтром (ППФ), фоточувствительными фильтрами (ФЧВ1, ФЧВ2), фильтрами нижних частот (ФНЧ1, ФНЧ2).

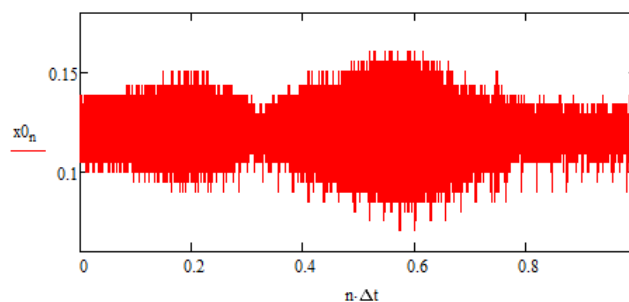


Рис. 4. Выходной сигнал сумматора

Было проведено математическое моделирование работы микроконтроллера [3]. Для проведения модуляций был взят сигнал на выходе сумматора аналоговой схемы измерительного преобразователя.

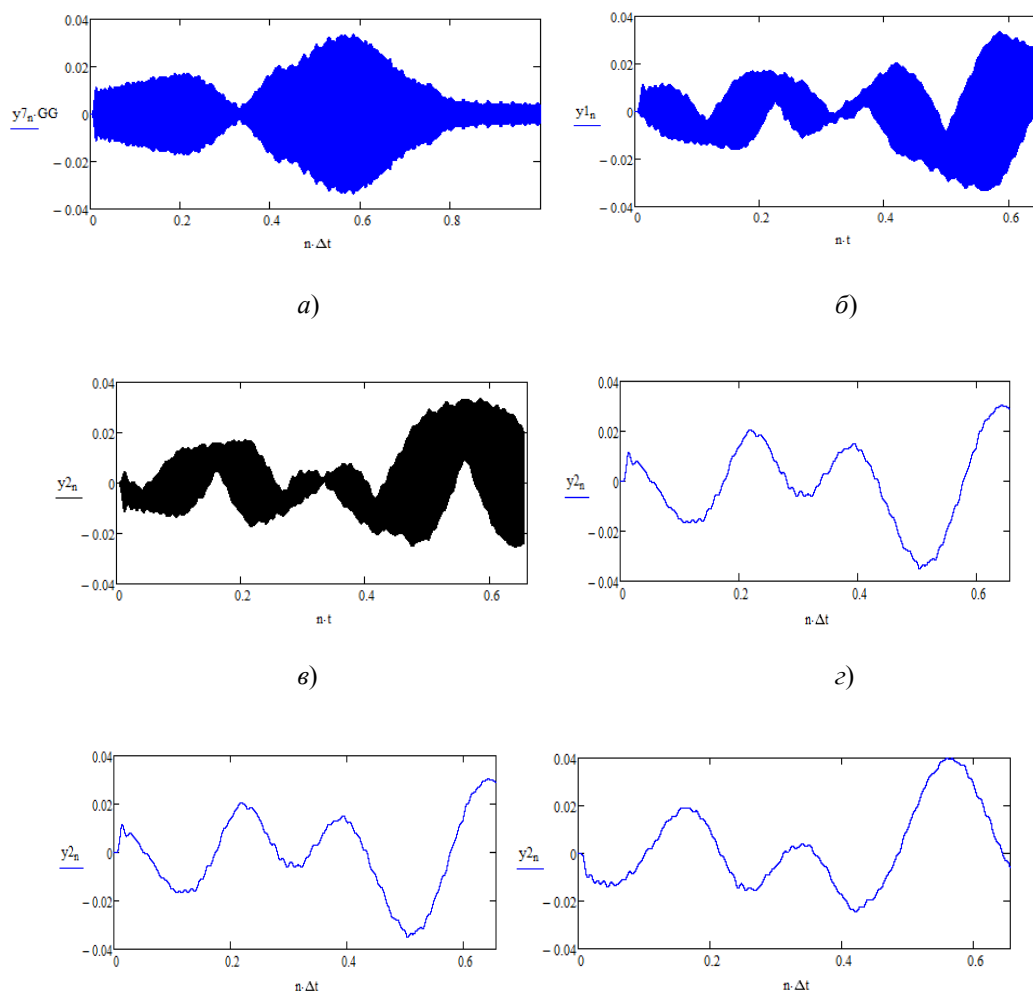


Рис. 5. Выходной сигнал с различных узлов схемы блока обработки сигналов датчика металлодетектора:
 а – выходной сигнал ППФ; б – выходной сигнал ФЧВ; в – выходной сигнал ФЧВ2; г – выходной сигнал ФНЧ1; е – выходной сигнал ФНЧ2

Моделирование работы микроконтроллера по узлам схемы блока обработки сигналов датчика металлодетектора, полностью копирующего аналоговый измерительный преобразователь, приведена на рис. 5.

Литература

1. Карпов, В. А. Преобразовательная техника: методические указания к курсовому проектированию / В. А. Карпов, О. М. Росткина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 43 с.
2. Кузнецов, А. И. Электромагнитные датчики и методы обработки сигналов / А. И. Кузнецов. – Минск : Технопринт, 2018.
3. Сидоров, В. Н. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие / В. Н. Сидоров. – М. : Горячая линия – Телеком, 2020.
4. Иванов, П. П. Электронные измерительные преобразователи: теория и практика / П. П. Иванов, С. С. Петров. – СПб. : Питер, 2017.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ДАВЛЕНИЮ И РАСХОДУ

П. А. Илларионов

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

Научные руководители: А. В. Ковалев, А. Е. Запольский

Рассмотрен метод автоматизированного мониторинга состояния насосного оборудования путем измерения давления и расхода.

Ключевые слова: насосное оборудование, автоматизация, давление, напор, расход.

В настоящее и ближайшее будущее время насосы являются и будут являться одним из ключевых видов промышленного оборудования, широко применяемого во многих отраслях промышленности. Надежность насосного оборудования оказывают значительное влияние на эффективность производственных процессов и безопасность объектов инфраструктуры. Насосное оборудование со временем изнашивается и становится причиной аварий и внеплановых остановов на технологических объектах.

Для своевременного выявления неисправности человек использует несколько способов:

- 1) замена насосного оборудования по истечении срока службы, заявленному производителем, но оно может быть еще исправно;
- 2) проверка текущего состояния по данным с датчиков оператором «на глаз»;
- 3) контроль состояния путем выявления посторонних шумов в работе насоса, находясь рядом с ним.

Основной недостаток таких способов проверки – человеческий фактор. У человека не всегда есть возможность приблизиться к оборудованию и проверить его, и особенно если он без опыта, то может не определить симптомы неисправности.

Для исключения человеческого фактора предлагается метод автоматизированного мониторинга состояния насосного оборудования. Он основан на снятии напорно-расходных характеристик оборудования и сравнении их с паспортными.

Допустим, насос центробежного типа работает непрерывно в некоторой гидравлической системе с автоматизированным управлением, направленным на поддержание заданного расхода, в сильно ограниченном пространстве. Со временем изнашиваются уплотнители и возникает внутренняя течь. Часть жидкости начинает циркулировать обратно внутрь рабочего колеса, не создавая полезного напора. Для устранения отклонения расхода система управления повышает частоту вращения двигателя насоса, что приводит к увеличению энергии, передаваемой жидкости. Однако значительная доля этой дополнительной энергии пойдет на компенсацию внутренних потерь, связанных с утечкой. Расход частично компенсируется, а уровень создаваемого давления останется ниже номинального значения.

Сравнение напорно-расходных характеристик исправного и поврежденного насосов показано на рис. 1. На графике видно, что при появлении утечки кривая зависимости сместится вниз, а увеличение оборотов позволит вернуть подачу ближе к исходному значению, но точка пересечения новой кривой с осью давления окажется ниже предыдущей точки, соответствующей нормальной работе. Математически это можно объяснить базовыми законами гидродинамики.

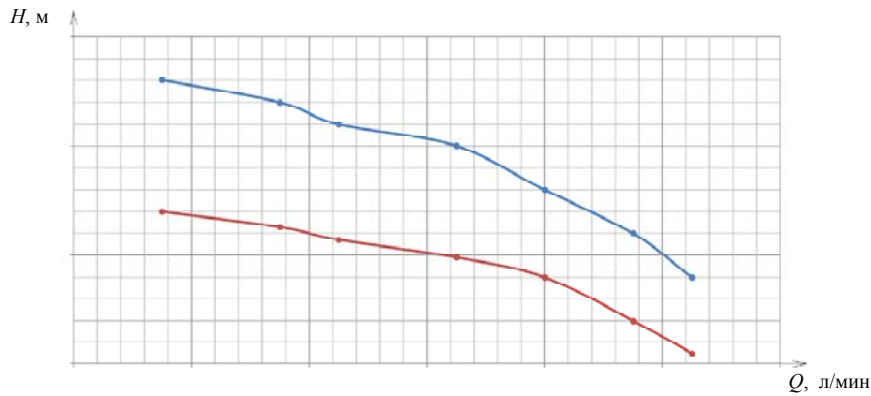


Рис. 1. Сравнение напорно-расходных характеристик исправного (А) и поврежденного (Б) насосов:
—●— – насос А; —●— – насос Б

Без учета утечек связь между напором и подачей выражается зависимостью вида:

$$H(Q) = a - bQ^n, \quad (1)$$

где a , b и n – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами насоса.

Если существует утечка объемом q , которая является функцией напора и конструкции насоса:

$$q(H) = KH^m, \quad (2)$$

где m – показатель степени, характеризующий тип утечки, то эффективная подача насоса станет равной:

$$Q_{\text{эф}} = Q - q(H) = Q - KH^m. \quad (3)$$

Поскольку теперь расход отличается от первоначального, новая напорно-расходная характеристика примет вид:

$$H_{\text{утеч}}(Q) = a' - b'(Q - KH^m), \quad (4)$$

где a' и b' – коэффициенты, которые будут зависеть от конкретных параметров установки и новых рабочих условий.

Управление насосом осуществляется по поддержанию заданного расхода Q_0 . Система автоматически регулирует частоту вращения n таким образом, чтобы достичь требуемого расхода:

$$Q(n) = C\omega^\alpha, \quad (5)$$

где C и α – константы, отражающие специфику конкретного насоса.

Подставляя (5) в (4), получаем новую формулу для напора:

$$H_{\text{утеч}}(Q_0) = a' - b'(C\omega^\alpha - KH_{\text{утеч}}^m)^n. \quad (6)$$

Решив данное нелинейное уравнение относительно $H_{\text{утеч}}$, получим новое значение напора при фиксированном расходе Q_0 и увеличенных оборотах $\omega > n_0$.

Таким образом, используя данный метод, можно создать устройство, снимающее без человеческого участия напорно-расходные характеристики насосного оборудования и, сравнивая их с паспортными, сможет точно определить критичный уровень износа с оповещением об этом, что позволит избежать аварийные и внеплановые остановки на технологических объектах [1, 2].

Для реализации такого устройства необходимо выбрать тип вычислительного устройства, продумать реализацию настройки устройства и удаленного доступа.

Для снятия характеристик насосного оборудования и проведения вычислений достаточно использовать микроконтроллер с небольшой тактовой частотой (8–20 МГц) и размером Flash-памяти (8–16 кБ). Для хранения паспортных данных можно дополнительно применить микросхемы памяти типа EEPROM.

Для более быстрого и удобного внесения паспортных характеристик насосного оборудования устройство должно иметь модули ввода и индикации параметров – дисплей и клавиатура.

Для своевременного предупреждения оператора о неисправности насоса или оперативного изменения настроек работы устройству необходим модуль связи (например, модуль с поддержкой промышленного протокола RS-485). Кроме этого такая связь позволит собирать данные с датчиков давления и расхода, не подключая их напрямую к устройству.

Устройство будет иметь небольшие габаритные размеры (не больше 7 модульных мест при размещении на DIN-рейку) и малое энергопотребление (до 10 Вт), однако сможет полностью освободить человека от наблюдения за состоянием насосного оборудования, что позволит полностью автоматизировать данный процесс.

Л и т е р а т у р а

1. Насосы и компрессоры : учеб. пособие / С. А. Абдурашитов, А. А. Тупиченков, И. М. Вершинин, С. М. Тененгольц. – М. : Недра, 1974. – 296 с.
2. Васильченко, В. А., Гидравлическое оборудование мобильных машин : справочник. – М. : Машиностроение, 1983. – 301 с.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ МОДУЛЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОДАЖ

М. М. Белко

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

Научные руководители: А. В. Сахарук, А. Е. Запольский

Рассмотрено применение искусственного интеллекта для прогнозирования спроса на товары в рамках информационной системы.

Ключевые слова: информационная система, общественное питание, прогнозирование спроса, автоматизация, база данных, клиент-серверное приложение, Qt, нейросети, LSTM, SQLite.

В условиях высокой конкуренции в сфере общественного питания предприятия сталкиваются с необходимостью оперативного реагирования на изменение спроса, сокращение издержек и повышение эффективности бизнес-процессов. Современные

заведения уже не могут ограничиваться традиционными методами управления. Для обеспечения устойчивости и прибыльности необходим переход к цифровым решениям, способным автоматизировать ключевые процессы и формировать обоснованные управленческие решения на основе данных.

Одним из таких решений является информационная система для предприятия общественного питания с интегрированным модулем прогнозирования продаж. Она представляет собой комплексное программное решение, включающее в себя серверную часть, клиентские приложения и интеллектуальный модуль анализа данных (рис. 1).

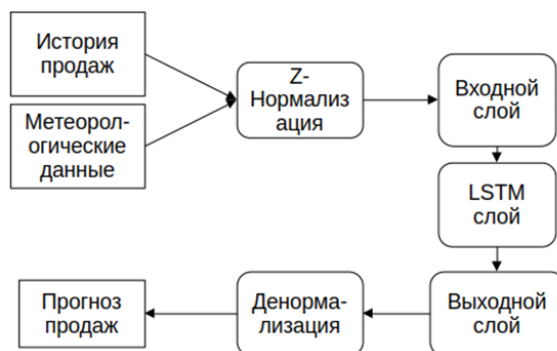


Рис. 1. Структура модуля прогноза продаж

Система обеспечивает автоматизацию процессов продаж, складского учета, аналитики и прогнозирования. Архитектура построена на модульной основе, что позволяет легко адаптировать ее под различные форматы заведений – от небольших кафе до сетевых ресторанов.

Ключевым элементом системы является модуль прогнозирования спроса, реализованный с применением методов машинного обучения. Он анализирует накопленные исторические данные о продажах, данные о времени суток, дне недели, сезонных и внешних факторах и формирует прогнозы по каждой товарной позиции. Это позволяет заранее определить оптимальные потребности в продуктах без излишков или дефицита, и, как следствие, оптимизировать закупки и складские запасы.

Процесс прогнозирования реализован с помощью модели LSTM (Long Short-Term Memory) – разновидности нейросети, способной учитывать последовательную природу временных данных и выявлять закономерности, недоступные при ручном анализе (рис. 2). Полученные прогнозы интегрируются в приложение для администрирования и доступны для анализа в виде графиков и отчетов.

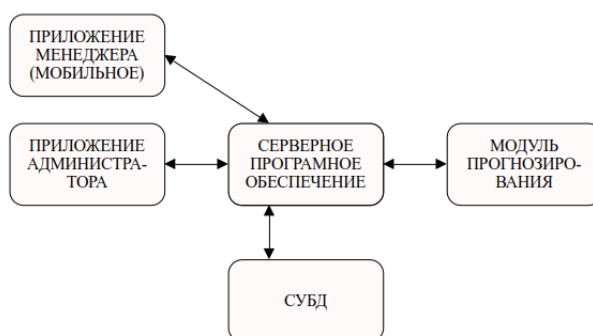


Рис. 2. Повторяющаяся модель в LSTM-сети

Взаимодействие между компонентами системы осуществляется через собственный сетевой протокол, разработанный на основе TCP/IP с применением современных методов шифрования (AES-256 и RSA). Это гарантирует безопасность передачи данных и устойчивость к внешним угрозам.

Для разработки программного обеспечения использован фреймворк Qt, обеспечивающий кроссплатформенную реализацию и современный графический интерфейс.

Приложение для администрирования позволяет управлять ассортиментом, ценами, точками продаж и сотрудниками. Кассовое приложение предназначено для быстрого оформления заказов и их регистрации. Все действия фиксируются и моментально передаются на сервер.

Информационная система создает единую цифровую среду, где все данные централизованно обрабатываются, хранятся и анализируются (рис. 3). Это позволяет руководству предприятия принимать решения на основе объективной картины происходящего, а не на основе интуиции или предыдущего опыта.

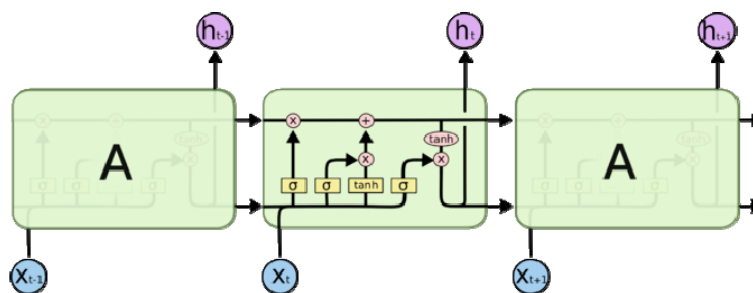


Рис. 3. Структурная схема информационной системы

Литература

1. Глушков, В. М. Основы построения автоматизированных систем управления / В. М. Глушков. – М. : Наука, 2008. — 310 с.
2. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. Deep Learning / Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. – MIT Press, 2016. – 775 p.
3. Hochreiter, S. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9 (8). – P. 1735–1780.
4. Gers, F. A. Learning to forget: Continual prediction with LSTM / F. A. Gers, J. Schmidhuber, F. Cummins // Neural Computation. – 2000. – Vol. 12 (10). – P. 2451–2471.
5. PyTorch C++ API. – URL: <https://pytorch.org/cppdocs/> (дата обращения: 29.05.2025).

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Д. В. Каханчик

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

Научный руководитель А. Е. Запольский

Рассмотрены основные особенности разработки комплексной системы контроля и управления для коммерческого автомобильного транспорта. Создание подобной системы позволит осуществлять контроль за основными параметрами и техническим состоянием

автомобиля, управлять частью его функций, отслеживать геопозицию транспортной единицы для отслеживания выполняемых ее маршрутов.

Ключевые слова: коммерческий транспорт, мониторинг, дистанционный канал связи, управление, бортовая система, мобильное приложение, GSM, GPS, одноплатный компьютер.

Современный коммерческий автомобильный транспорт играет ключевую роль в обеспечении эффективной логистики и бесперебойного функционирования множества отраслей экономики.

Для повышения уровня экономичности и ресурсосбережения коммерческого автомобильного транспорта, повышения его безопасности необходимо внедрение интеллектуальной информационной системы контроля и управления (ИСКиУ), которая будет способна отслеживать техническое состояние автомобиля, его параметры, передавать эти данные и принимать команды через дистанционный канал связи.

Разрабатываемая комплексная система является аппаратно-программным решением. Аппаратная часть включает в себя электронный модуль контроля, управления и сбора данных, датчики сбора значений ключевых параметров, силовые модули, модуль отслеживания геопозиции, модуль передачи данных. Программная часть должна включать в себя – программное обеспечение для собственно блока управления и контроля, программное обеспечение для базы данных и пользовательский графический интерфейс.

Система организована в виде многоуровневой структуры, где каждый уровень выполняет специфическую функцию: сбор данных, обработка и управление, передача данных, хранение и анализ, а также пользовательский интерфейс. Структурная схема комплексной системы контроля и управления показана на рис. 1.

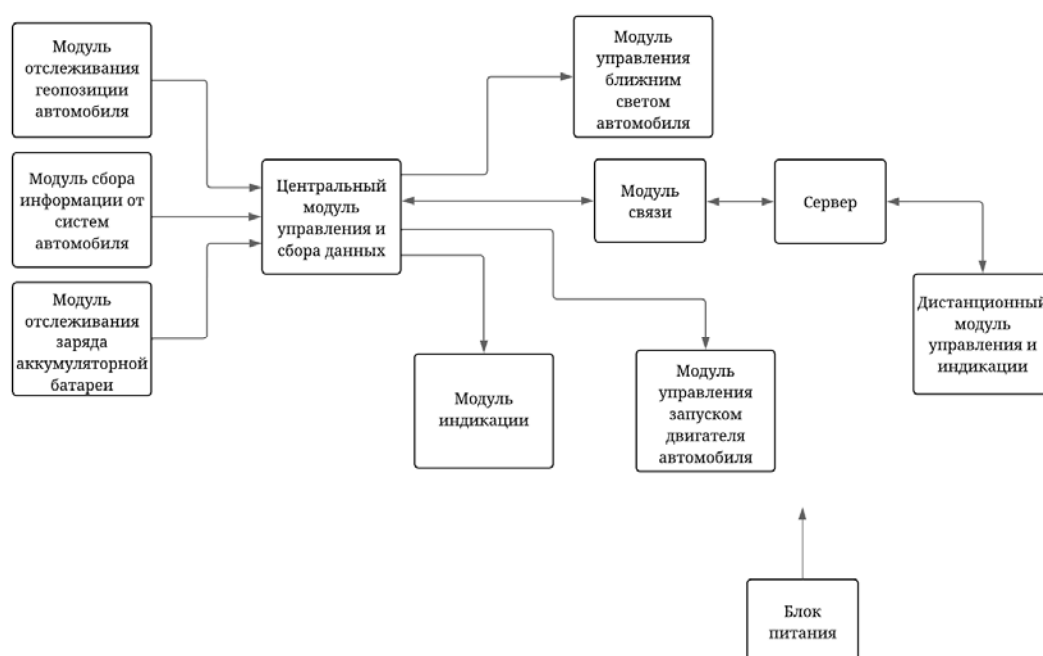


Рис. 1. Структурная схема комплексной системы контроля и управления для коммерческого автомобильного транспорта

В качестве головного контроллера можно использовать микроконтроллер ESP32. В проекте использован микроконтроллерный модуль ESP32-H2-MINI-1. Модуль поддерживает протоколы WiFi и Bluetooth, что делает его идеальным для обработки данных с датчиков и управления функциями в реальном времени. Модуль оснащен АЦП для обработки сигналов с аналоговых. Модуль поддерживает протоколы MQTT и HTTP для связи с сервером, что обеспечивает гибкость интеграции [1].

Для реализации функции отслеживания геопозиции используется GPS-модуль NEO-6M, который обладает точностью позиционирования 2,5 м, частотой обновления данных – 5 Гц, отслеживание скорости – до 500 м/с, точность отслеживания скорости – до 0,1 м/с [2].

Модуль измерения напряжения и тока INA219 измеряет параметры в следующих диапазонах: 0–26 В, 0–3 А. Используется в системе для измерения напряжения аккумулятора с погрешностью менее 1 %. Модуль подключен через интерфейс I2C. При низком и критически низком заряде аккумулятора блок управления системы контроля осуществляет соответствующее уведомление [3].

Для передачи данных можно использовать GSM-модуль SIM800L. Модуль поддерживает GSM, GPRS, TCP/IP. Поддерживаемые частоты 850/900/1800/1900 МГц [4].

Для подключения к разъему для диагностики OBD-II необходим CAN-трансивер TJA1050, который позволит получить доступ к бортовым системам автомобиля – датчики, ключевые блоки управления [5].

Для осуществления локальной индикации можно использовать различные жидкокристаллические дисплеи форматов 16×4 , 32×4 и тому подобных. Стоит отметить, что проект подразумевает использование для индикации и вывода всех основных данных экраны устройств, которые будут иметь соответствующее программное обеспечение для подключения их к блоку управления.

Модуль управлением запуска двигателя и управления ближнего света фар реализован на применении модулей реле. Функция «Автоматическое включение ближнего света» является полезной, так как позволяет повысить безопасность дорожного движения. Данная функция подразумевает наличие возможности автоматического включения ближнего света фар в зависимости от временного промежутка. Функция «Автоматическое включение двигателя» позволит управлять запуском двигателя. У данной функции 2 назначения: 1 – реализация автозапуска для прогрева двигателя; 2 – блокировка возможности запустить двигатель при наличии критических ошибок основных систем.

Бортовая сеть (12 В или 24 В) преобразовывается в напряжение 3,3 В для питания основных составляющих комплексной системы. Для этого используется преобразователь MP2307.

В качестве локального сервера системы выступает собственно блок управления системы на базе ESP32. Он обрабатывает данные с датчиков, опрашивает бортовые системы автомобиля и по заданному сценарию отправляет соответствующие сигналы на управляемые устройства. При этом в качестве дисплея может выступать как подключенный жидкокристаллический дисплей по проводному интерфейсу так и дисплей любого внешнего устройства, подключенного по беспроводному протоколу. Внешнее устройство с подготовленным для него программным обеспечением выступает и в качестве дистанционного пульта.

Однако такая конфигурация комплексной системы подходит для работы с 1 транспортной единицей. Если таких транспортных единиц несколько, то для сбора, хранения и обратотки информации с них необходима реализация полноценного сервера с базой данных.

В качестве глобального сервера может выступать одноплатный компьютер Orange Pi 4 с процессором RK3399 (6 ядер, до 2 ГГц), 4 ГБ RAM и хранилищем eMMC 32 ГБ, используемый для хранения данных (до 1 млн записей) и обработки запросов через HTTP/REST [6].

Orange Pi 4 используется как сервер для хранения данных от нескольких десятков блоков управления. Одноплатный компьютер имеет интерфейсы GPIO и USB, что позволяет реализовать без каких-либо сложностей дополнительные внешние устройства, включая невстроенный в компьютер модуль GSM. Для дистанционного сопряжения с внешними устройствами имеется поддержка Bluetooth и Wi-Fi. Для сопряжения с персональными компьютерами можно использовать порт Ethernet. Есть слот для подключения накопителей памяти формата MicroSD. А для подключения внешних переносимых накопителей памяти формата SSD можно использовать USB-порт. Одноплатный компьютер поддерживает различные операционные системы, включая Linux, что делает его полноценным устройством для реализации сервера. В качестве системы управления базы данных может выступать MySQL.

Мобильное приложение для ОС Android является дистанционным пультом управления. Основные функции приложения обеспечивают сбор и визуализацию данных о состоянии автомобиля, а также управление некоторыми параметрами в реальном времени. Приложение написано на Qt/QML и обеспечивает визуализацию карты и отображение основных параметров. С помощью модуля Qt Positioning реализовано определение текущего местоположения транспортной единицы и ее отображение на карте с использованием компонента Map и слоя OpenStreetMap.

Программные компоненты взаимодействуют по сети, используя MQTT протокол, обеспечивая двухстороннюю связь: от устройства – для мониторинга, к устройству – для управления. Для управления в интерфейсе приложения имеются кнопки.

Литература

1. ESP32-H2-MINI-1 Datasheet. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-h2-mini-1_mini-1u_datasheet_en.pdf (дата обращения: 01.03.2025).
2. Модуль GPS NEO-6M USB/UART-TTL/SMA с активной антенной. – URL: <https://compactool.ru/modul-gps-neo-6m-usbuart-ttlsma-s-aktivnoj-antennoj> (дата обращения: 08.03.2025).
3. Документация INA219. – URL: <https://dinistor.ru/files/INA219.pdf> (дата обращения: 08.03.2025).
4. SIM800L Hardware Design V1.00. – URL: https://seeeddoc.github.io/LoNet-GSM-GPRS_Breakout/res/SIM800L_Hardware_Design_V1.00.pdf (дата обращения: 08.03.2025).
5. Orange Pi 4. – URL: <http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicro-controllers/details/Orange-Pi-4.html> (дата обращения: 08.03.2025).

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОМ СПИНОВОЙ ФИЗИКИ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

А. Е. Запольский

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

Научные руководители: Е. С. Кокоулина, Ю. В. Крышнев,
Л. А. Захаренко, А. В. Сахарук

Рассмотрены технические возможности реализации системы управления детектором спиновой физики для сверхпроводящего коллайдера протонов и тяжелых ионов, кото-

рый строится на базе Объединенного института ядерных исследований. Показаны особенности реализации каждого уровня многоуровневой системы.

Ключевые слова: система управления детектором, система SPD, детектор NICA, FPGA, ПЛИС, аппаратно-программный комплекс, SCADA, Объединенный институт ядерных исследований.

Система управления детектором спиновой физики (SPD) обеспечивает управление и мониторинг, анализ полученных данных, управление системой безопасности. Для эффективной реализации управления система разделена на три уровня – нижний, средний, высокий.

Основными элементами нижнего уровня являются измерительные каналы и сенсоры, устройства ввода и вывода, источники питания высокого и низкого напряжения.

Средний уровень является основным «мозгом» системы, который состоит из устройств управления и сбора данных. Данный уровень является «мостом», который передает информацию, собранную датчиками нижнего уровня, на центральный сервер верхнего уровня. Второй функцией данного уровня является управление исполнительными устройствами – программируемые логические контроллеры и подсистемы.

Человеко-машинный интерфейс (HMI), отвечающий на взаимосвязь между системой управления и оператором, является объектом высокого уровня. Кроме этого данный уровень включает базу данных для хранения параметров и конфигураций системы, алгоритмы макроуправления. Программное обеспечение высокого уровня состоит из SCADA-системы и программного обеспечения для поддержки событийно-ориентированного управления и распределенных систем. Конечной задачей высокого уровня является организация диспетчерского пульта для организации работы оператора [1–3].

Система управления измеряет три основных параметра – напряжение, ток и температура.

Измерение тока может быть реализовано с использованием измерительного шунта. Схема измерения включает в себя дифференциальный усилитель и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Опорное напряжение АЦП задается цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП). Имеющиеся блок быстрого преобразования Фурье (ББП) выполняет расчет спектральных составляющих тока. Для обработки большого количества точек измерения используются многоканальные АЦП и ЦАП.

Для АЦП необходимо устройство со следующими параметрами: 8 каналов, разрешение – 24 бит, низкий уровень шума и высокая точность. Такими параметрами обладает микросхема AD7700 [4].

Для ЦАП необходимо устройство со следующими параметрами: 8 каналов, разрешение – 12 бит, встроенный источник опорного напряжения, наличие SPI, высокая точность. Такими параметрами обладает микросхема MAX5725 [5].

В качестве измерительного преобразователя температуры можно использовать бесконтактный инфракрасный термометр, который имеет малошумящий усилитель, 17-битный АЦП, имеющий высокую точность и разрешающую способность. Такими параметрами обладает датчик MLX90614, который имеет заводскую калибровку, цифровой выход ШИМ и специализированную шину управления системой SMBus. В стандартном режиме происходит непрерывное измерение температуры в диапазоне -20 – 120 °C с выходным разрешением $0,14$ °C [6].

В качестве управляющего устройства, которое считывает данные с измерительных преобразователей, и передает их по сетевому протоколу CANopen по запросу от модулей среднего уровня, может быть использована программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС, по англ. FPGA), например, Altera Cyclone V.

Данное устройство позволяет запускать операционную систему на базе ядра Linux, реализовывать графический интерфейс для локального управления и отображения информации [7].

Работа с датчиками осуществляется через АЦП, формирование аналоговых управляющих сигналов осуществляется с помощью ЦАП, а дискретные управляющие сигналы могут формироваться за счет цифровых портов вывода. Ядра FPGA могут применяться для цифровой обработки измеряемых сигналов в реальном времени и передачи ее в операционную систему.

На основе операционной системы имеется возможность реализации модулей для структурирования информации и осуществления коммуникации с сервером системы.

Процессорные ядра FPGA основаны на архитектуре ARM Cortex-A9 Dual Core – двухъядерный процессор с поддержкой многопоточности.

В рамках предлагаемого проектного решения предполагается использование отладочной платы Terasic модели DE1-SoC-MTL2 на базе устройства FPGA Cyclone V. Основные параметры: 85000 логических элементов, наличие аппаратной процессорной системы (HPS) в виде интегрированной системы на кристалле (SoC) и программируемой логической интегральной схемы (FPGA); наличие мультимедийных систем (сенсорный жидкокристаллический дисплей с поддержкой технологии Multi-Touch, ТВ-декодер, поддержка видеocodeка 24-bit Codec); наличие портов расширения (2 порта 40-Pin GPIO, порт 10-pin ADC Input Header, 1 порт LTC); наличие пользовательских портов ввода/вывода (10+1 светодиодов (HPS), 4+1 кнопок без фиксации (HPS), 10 переключателей, 6 семисегментных индикаторов); наличие 24-bit ЦАП VGA, 8-канального АЦП и акселерометра. Для отладки и программирования можно применить программатор и отладчик USB Blaster II, который связывает отладочную плату и персональный компьютер через интерфейс USB. Для работы с устройством применяется программное обеспечение для компьютера – интегрированная среда разработки Quartus Prime. Для тестирования, отладки, мониторинга и программирования имеется поддержка интерфейса JTAG (Joint Test Action Group), что значительно упрощает разработку и тестирование электронных систем [7, 8].

Наличие сенсорного дисплея позволяет организовать удобный интерфейс для разработки и сборки системы без использования дополнительных устройств вывода.

Для реализации информационной системы высокого уровня предлагается использовать SCADA-систему WinCC OA, которая позволит организовать управление, мониторинг и визуализацию всех процессов. Система имеет открытую архитектуру и сетевую конфигурацию, обладает высокими масштабируемостью и отказоустойчивостью. Важным ее преимуществом является независимость от операционных систем. Поддержка пользовательских скриптов и расширений, возможность интеграции сторонних компонентов через API или собственные модули, позволяет значительно расширить возможности данного программного продукта [7].

Сетевая конфигурация позволяет организовать децентрализованное управление и работу с распределенными объектами, реализовать легкое масштабирование через добавление серверов или клиентов.

Механизмы дублирования серверов, резервного копирования и аварийного восстановления значительно повышают общую отказоустойчивость системы управления.

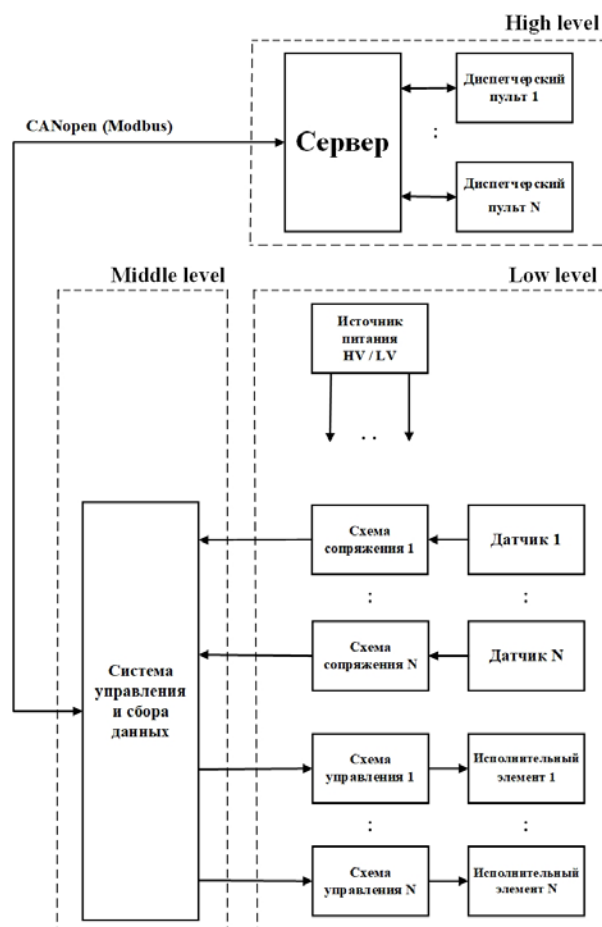


Рис. 1. Структурная схема системы управления детектором

Предлагаемая структурная схема системы управления детектором показана на рис. 1.

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. Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [et al.]. – 1 2021, 2102.00442.
3. Electromagnetic calorimeter for the SPD experiment. Physics of Particles and Nuclei / O. P. Gavrischuk, A. I. Maltsev, V. V. Tereshenko [et al.]. – 52:975, 2021.
4. AD7700 Datasheet. – URL: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=AD7700AN> (дата обращения: 07.11.2024).
5. MAX5725 Datasheet. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/452460/MAXIM/MAX5725.html> (дата обращения: 08.11.2024).
6. MLX90614 Datasheet. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/224153/MELEXIS/MLX90614.html> (дата обращения: 08.11.2024).
7. Terasic DE1-SoC-MTL2 Development and Education Kit. – URL: <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=167&No=930> (дата обращения: 15.11.2024).
8. WinCC OA Documentation Terasic DE1-SoC-MTL2. – URL: https://www.winccoa.com/documentation/WinCCOA/latest/en_US/index.html (дата обращения: 25.11.2024).

УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ С ДИСТАНЦИОННЫМ КАНАЛОМ СВЯЗИ

В. Д. Тур

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

Научные руководители: А. Е. Запольский, Ю. В. Крышнев

Отражены особенности разработки универсальной системы управления осветительными приборами с применением дистанционных каналов связи.

Ключевые слова: ESP32, Bluetooth, Wi-Fi, умная система освещения, автоматизация, дистанционное управление, мобильное приложение, энергетическая эффективность, интернет вещей, IoT, Bluetooth Low Energy.

Универсальная система управления освещением с дистанционным каналом связи представляет собой комплекс аппаратно-программных средств, предназначенных для управления осветительными устройствами (умные лампы, LED-ленты и светильники) с использованием протоколов связи Wi-Fi и Bluetooth Low Energy (BLE).

Универсальная система поддерживает интеграцию различных видов датчиков – датчики звука, движения и освещенности. На рис. 1 представлена структурная схема устройства универсального управления освещением.

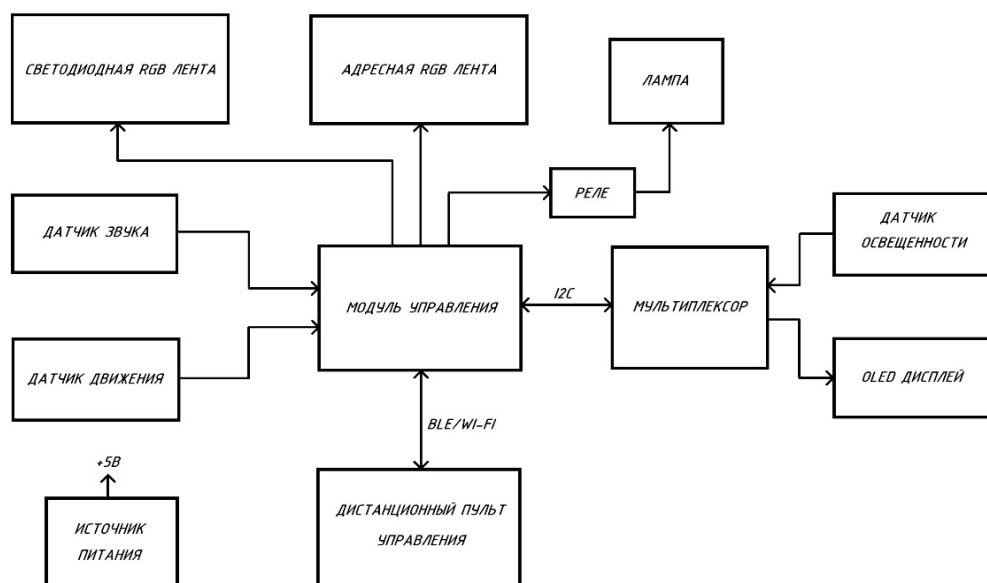


Рис. 1. Структурная схема универсальной системы управления освещением с дистанционным каналом связи

Важным аспектом, который учитывался при разработке системы, являлась реализация доступности для большинства пользователей, которые обладают минимальными техническими навыками.

На рис. 2 представлена принципиальная электрическая схема системы. В качестве главного ядра системы выполнения использовался микроконтроллер ESP32 с поддержкой протоколов Wi-Fi и BLE. Дополнительными периферийными устройст-

вами системы являются датчик освещенности BH1750, датчик движения HC-SR501, датчик звука KY-037, мультиплексор TCA9548A для управления I2C-устройствами, OLED-дисплей с диагональю 0,96" [1–5].

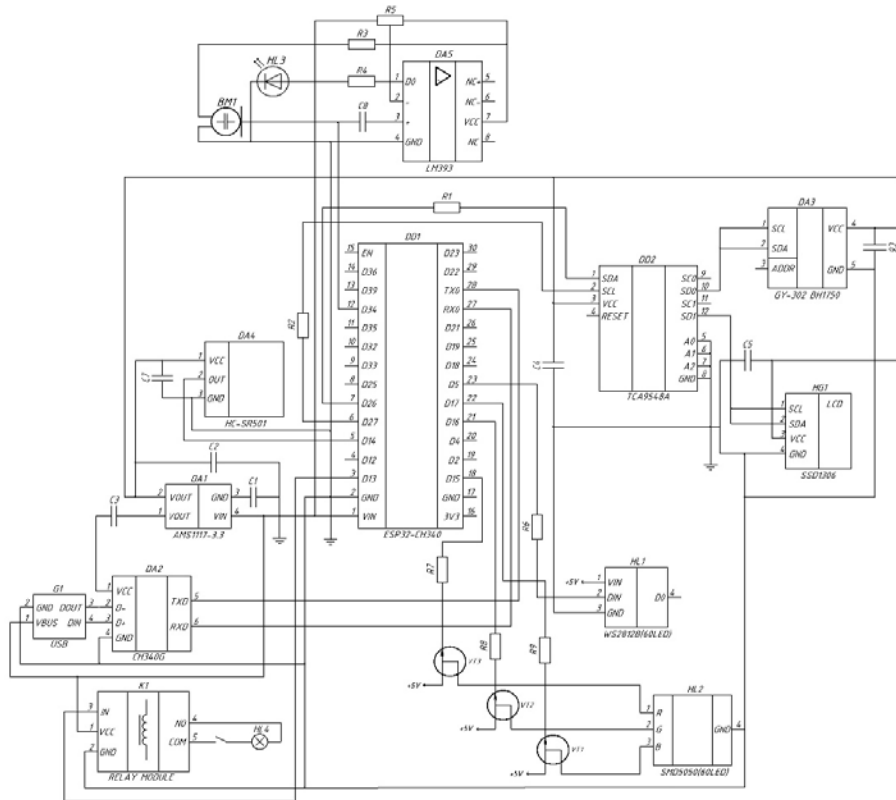


Рис. 2. Принципиальная схема универсальной системы управления освещением с дистанционным каналом связи

Система поддерживает работу с адресными светодиодными RGB лентами (например, WS2812B), светодиодными RGB-лентами и лампами накаливания.

Для управления традиционными лампами используется реле. Интеграция беспроводной связи требует оптимизации протоколов для минимизации энергопотребления. Надежность связи обеспечивается использованием протокола BLE, который устойчив к помехам и обеспечивает стабильное соединение даже в условиях плотной застройки или присутствия других беспроводных устройств.

Использование беспроводных протоколов связи позволяет организовать получение команд от внешних устройств. Такой подход создает замкнутый цикл управления, где пользовательский ввод влияет на работу датчиков и исполнительных устройств.

Датчики движения, звука и освещенности предназначены для сбора данных о внешней среде, таких как уровень освещенности, присутствие людей или животных и других изменений в пространстве. Эти данные передаются в модуль управления, где используются для принятия решений об активации и регулировке освещения.

Пульт дистанционного управления системы является мобильное приложение на базе операционной системы Android. На рис. 3 представлен скриншот интерфейса разрабатываемого приложения. Пульт поддерживает 10 режимов – сценариев управления освещением.

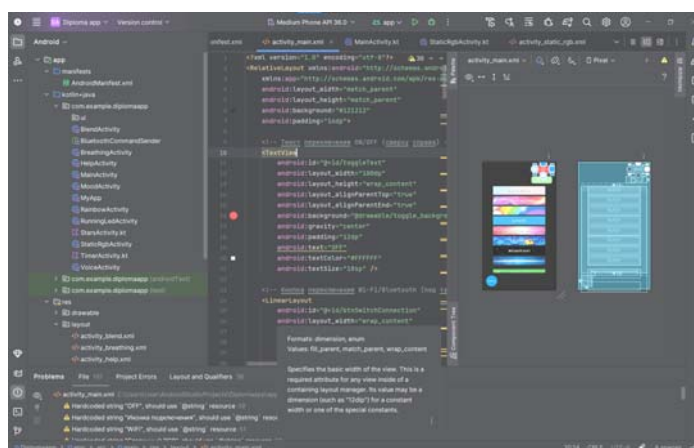


Рис. 3. Скриншот интерфейса Android для реализации пульта дистанционного управления освещением

Сравнивая разработку с аналогами, стоит отметить высокую дальность связи (до 15 м) и возможность гибкой настройки системы через мобильное приложение. Разработанная система имеет широкие функциональные возможности по детальной настройке освещения в помещении. Кроме этого проработаны вопросы по энергосбережению системы, среди них оптимизация по энергопотреблению за счет режимов глубокого сна микроконтроллера ESP32 и адаптивного переключения протоколов.

Литература

1. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. – URL: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-references> (дата обращения: 01.03.2025).
2. BH1750 Datasheet. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/338083/ROHM/BH1750FVI.html> (дата обращения: 14.03.2025).
3. HC-SR501 Datasheet. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1131987/ETC2/HC-SR501.html> (дата обращения: 16.03.2025).
4. KY-037 Datasheet. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1284505/JOY-IT/KY-037.html> (дата обращения: 16.03.2025).
5. TCA9548A Datasheet. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/463225/TI1/TCA9548A.html> (дата обращения: 16.03.2025).

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ С НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ

Б. И. Киселев

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

Научные руководители: А. Е. Запольский, А. В. Сахарук

Отражены особенности разработки программного обеспечения для организации работы с множеством нейронных сетей в рамках единого интерфейса.

Ключевые слова: нейронные сети, QT, QtCreator, C++, генерация текста, программное обеспечение, система управления базами данных, СУБД.

С развитиями технологий компьютерной техники и повышения мощности устройств началось активное внедрение нейронных систем для решения совершенно разных задач.

В настоящее время количество нейронных сетей превысило более 100 единиц, каждая из которых заточена под решения узконаправленных задач – генерация текста, генерация картинок и анимация кадров, создание видео, озвучка, написание музыки и т. д. Одни нейронные сети лучше справляются с генерацией картинок, другие – с генерацией кода, третьи – с генерацией видео. С каждым днем список полезных ресурсов увеличивается, как и число их пользователей.

Основной целью данной работы является разработка программного обеспечения, которое позволяло бы пользователю работать одновременно с множеством чатов нейронных сетей. На данный момент пользователям приходится взаимодействовать с каждой нейронной сетью в отдельности через их интерфейсы. Пользователи взаимодействуют через чаты с нейронными сетями, используя их Web-версии или с помощью их отдельных фирменных приложений. Поиск каждого продукта в отдельности и взаимодействие через их индивидуальные приложения затрачивают как временные ресурсы пользователя, так и аппаратные ресурсы их устройств.

Многие пользователи не знают обо всем перечне нейронных сетей, которые им бы могли упростить работу. Идея совместить все продукты в одном приложении может помочь, как одновременно сократить время поиска информации, так и сравнивать ответы на один вопрос от разных нейросетей для анализа и выбора более качественного ответа.

Разработка проекта велась на языке C++ с использованием Qt библиотек для реализации пользовательского интерфейса, работы с JSON-запросами и работы с системой управления базами данных (СУБД).

Основные библиотеки Qt, которые были использованы в проекте – QWidget и QObject. С помощью библиотеки QWidget реализованы все основные элементы, например, текстовые поля или списки элементов. С помощью библиотеки QObject реализована работа с сигнально-слотовыми методами, которые обеспечивают переход от одного объекта к другому, а также работу с СУБД или с серверами и HTML-запросами. Использование данных компонентов значительно упростили разработку программного обеспечения [1].

Такие инструменты, встроенные в QtCreator, помогают разрабатывать качественный пользовательский интерфейс на основе уже созданных элементов, которые предоставляют библиотеки Qt.

Кроме этого разработчику доступно создание собственных объектов, которые будут унаследованы от изначальных библиотек, это позволяет изменять ключевые параметры элементов, например, сделать динамическое изменение размеров, или придать свойства одного элемента другому, реализуя множество различных кастомных виджетов.

Среда разработки в QtCreator позволяет компилировать программу, осуществлять поиск ошибок, имеет возможность совершать прерывания на нужной строке, запускать режим исправления ошибок, при котором при крахе программы выводится системная ошибка и указание, на какой строке программа дала сбой [1, 2].

На рис. 1 изображен интерфейс разработанного программного обеспечения для работы с нейронными сетями, которая выполнена в минималистичном стиле и с максимально понятным интерфейсом, что позволяет ее использовать большинству пользователей вне зависимости от их компьютерной грамотности.

Основное окно программы включает в себя два основных виджета-элемента. Первый (левый) – Окно выбора чата, тут собраны все созданные пользователем чаты. У каждого из них есть иконка нейросети и имя, которое пользователь им задает. Пользователь может через Меню настроек настроить индивидуально параметры окна с чатами (изменить размер), удалить или создать новый.

После нажатия на один из существующих чатов появляется второй виджет (правый) – Окно чата с нейросетью. Интерфейс данного окна состоит из ряда элементов – Кнопка закрытия чата, Поле ввода сообщений, Кнопка отправки и Переписка с нейронной сетью.

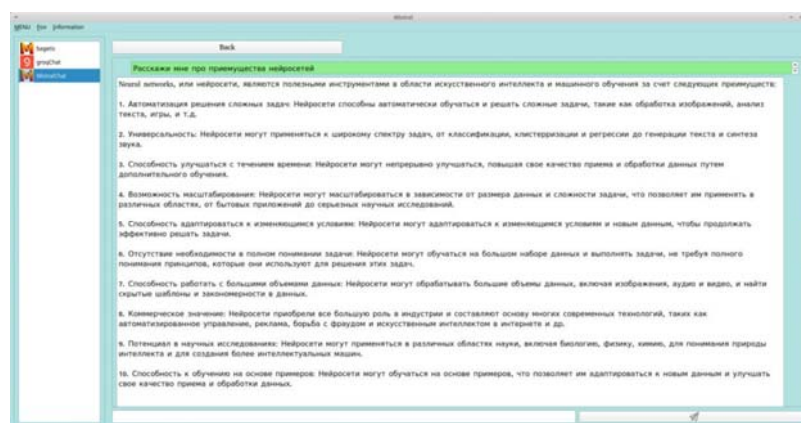


Рис. 1. Внешний вид интерфейса разработанной программы

После ввода пользователем сообщения-запроса, он может нажать на кнопку «Отправить» или нажать на клавишу Enter на своей клавиатуре. После отправки сообщения начинается запрос на обработку с последующим выводом ответа на экран.

Все переписки и чаты сохраняются, благодаря использованию СУБД, что позволяет решить проблему случайного закрытия чата пользователем.

Интерфейс программы позволяет пользователю настраивать шрифт, цвет фона, размер виджетов чата и API-ключи для доступа к нейросетям. При вводе неправильного ключа, отсутствии подключения к сети Интернет, отсутствии доступа к чатам без использования технологий VPN или Proxu, пользователь получит сообщение об ошибке. Ранее введенное сообщение не сохранится, так как ответ на него не был получен.

При расширении Основного окна размер текстовых блоков, кнопок и полей ввода пропорционально изменится. Аналогичное действие произойдет при изменении шрифта. Однако изменения чат-блоков доступны только через Меню настроек.

Все функции программного обеспечения расположены в выпадающем меню и имеют «горячие клавиши» для их вызова. При закрытии программы сохраняется размер окна, цвет фона, шрифт чата, а также все переписки и сами чаты с нейронными сетями.

Разработанное программное обеспечение позволяет пользователю удобно работать с различными нейронными сетями, объединенными в единый интерфейс. При этом сосредоточенность в рамках одной программы позволяет добиться более удобного процесса работы без необходимости переключаться между множеством интерфейсов.

Л и т е р а т у р а

1. Qt Creator Documentation. – URL: <https://doc.qt.io/qtcreator> (дата обращения: 16.03.2025).
2. Шлее, М. QT 5.10. Профессиональное программирование на C++ / М. Шлее. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. — 1072 с. : ил. – (В подлиннике).

Научное издание

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ЭНЕРГЕТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

**МАТЕРИАЛЫ
XXV Международной научно-технической
конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых**

Гомель, 24–25 апреля 2025 года

**В двух частях
Часть 1**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редактор *Т. Н. Мисюрова*

Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 09.10.25.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 30,69. Уч.-изд. л. 24,71.

Тираж 30 экз. Заказ № 552/55.

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.

пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель