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

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ЭНЕРГЕТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

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

Гомель, 23–24 апреля 2026 года

В двух частях
Часть 1

Гомель 2026

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 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. Бабич*
канд. техн. наук, доц. *Н. В. Иноземцева*
канд. техн. наук, доц. *Ю. Л. Бобарикин*
канд. техн. наук, доц. *Ж. В. Кадолич*
канд. техн. наук, доц. *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. *В. В. Богуш*
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

И88 **Исследования** и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2026 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, 2026. – 346 с.

ISBN 978-985-535-633-3.

Содержатся материалы XXVI Международной научно-технической конференции по следующим направлениям: машиностроение и нефтегазоразработка; материаловедение и технологии обработки материалов; энергетика; радиоэлектроника, автоматизация, телекоммуникации и связь.

Для студентов, аспирантов и молодых ученых.

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)
ББК 30+65

ISBN 978-985-535-633-3 (ч. 1)
ISBN 978-985-535-635-7

© Оформление. Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Мартьянов Ю. В.*, *Бобарикин Ю. Л. Повышение качества металлокорда как залог технологического суверенитета 9
Ермонина И. В. Использование комплексной оценки объектов природного и историко-культурного наследия в туристической деятельности 13
Сидоркина В. А.*, *Карчевская Е. Н. Архитектура доверия в цифровых каналах промышленных рынков: модель многофакторной верификации поставщика 19
Грунтович Н. В. Новые научные направления растут из задач производства 24

Секция I. МАШИНОСТРОЕНИЕ И НЕФТЕГАЗОРАЗРАБОТКА

Алексеев А. А.*, *Дмитриев С. И. К вопросу о переточке резцов для станков с ЧПУ 29
Скируха И. А.*, *Хазеев Е. В. Разработка гидравлической системы снегоочистителя Амкодор 9531 в программном комплексе Fluidsim 31
Стасенко Т. Д.*, *Стасенко Д. Л. Производительность гидроабразивной резки различных материалов 34
Писарев В. Ю.*, *Злотников И. И. Изучение влияния добавок нефтешлама на смачивающую способность и адгезию битума 38
Гордеенко Э. А.*, *Михайлов М. И. Особенности планирования траекторий стационарных роботов с цикловой и числовой системой управления 40
Ткачева В. Д.*, *Шепелева И. С. Технологические аспекты проведения гидроразрыва пласта с использованием жидкости разрыва на основе полиакриламидов на традиционных типах коллектора 46
Долгий Б. И.*, *Акулова Е. М. Анализ причин потери работоспособнасти фланца привода измельчающего барабана комбайна «Палессе FS8060» 48
Малышко А. О.*, *Атвиновская Т. В. Разработка рекомендаций по подбору технологических жидкостей с учетом геолого-технических особенностей регионов (на примере Калининградской области) 51
Лацык Д. В.*, *Михайлов М. И. Исследование рабочей зоны стационарного робота с шестью степенями подвижности 53
Кирьянов Р. О.*, *Стасенко Д. Л. Особенности производства заготовок корпусов редукторов 58
Клевжиц Д. А.*, *Андреевец Ю. А.*, *Стасенко Д. Л. Схемотехнические решения гидросистем мобильных машин с LS-управлением 61
Тарун П. А.*, *Андреевец Ю. А. Изучение видов резервирования в гидросистемах 64
Матвеенцева М. В.*, *Михайлов М. И. Оптимизация периода стойкости инструментальной наладки для обработки корпусных деталей на станках с ЧПУ 68
Ридкина К. В.*, *Родзевич П. Е. Определение силы сопротивления вмятию лезвия ножа измельчающего аппарата барабанного типа 71
Закревский А. А.*, *Михайлов М. И. Анализ жесткости и виброустойчивости конструкции стационарного робота 74

Невзоров М. В.*, *Петришин Г. В. Перспективы использования отходов металлургического производства в качестве порошкового сырья для нанесения покрытий 76
Аббас Ф. А.*, *Михайлов М. И. Особенности конструирования роботизированной системы инструментообеспечения обрабатывающего центра..... 78
Козаченко К. В.*, *Михайлов М. И. Разработка программного комплекса системы инструментообеспечения обрабатывающего центра на основе мобильного робота 80

Секция II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Пермяков Д. В.*, *Мартьянов Ю. В. Особенности моделирования процессов деформации металлов 82
Мельников Н. Н.*, *Мартьянов Ю. В. Возможности и перспективы численного моделирования 84
Левковец Я. И.*, *Мартьянов Ю. В. Моделирование штамповки средствами QForm 87
Борисевич В. М.*, *Рогов С. В. Исследование износостойкости поверхностей деталей машин после магнитно-электрической наплавки 89
Горовцова В. В.*, *Бобрышева С. Н. Получение градиентных фильтров методами аддитивных технологий 91
Сурма В. С.*, *Бобрышева С. Н. Градиентные материалы в аддитивных технологиях 95
Гуща А. О.*, *Петришин Г. В. Криогенная обработка для упрочнения осевого инструмента 98
Левкина А. Д.*, *Стасенко Д. Л. Влияние материалов и параметров 3D-печати на зольность выжигаемой модели..... 100
Селюков И. В.*, *Бобрышева С. Н. Анализ и выбор материалов для получения градиентых фильтров 104
Стасенко Т. Д.*, *Процко В. Ю.*, *Стасенко Д. Л. Теплопотери капельной фазы расплава в полете к мишени при газотермическом напылении..... 107
Гавриленко Е. А.*, *Прусенко И. Н.*, *Одарченко И. Б. Фотополимерная печать как фактор повышения точности и технологической устойчивости литейных процессов..... 110
Лапицкий К. Д.*, *Одарченко И. Б.*, *Прусенко И. Н. Современные полимеры для FDM-печати оснастки: стандарты качества и методы испытаний 114
Левкина А. Д.*, *Поздняков Е. П. Сравнительный анализ материалов для 3D-печати выжигаемых моделей 117
Петровский А. С.*, *Ухарцева И. Ю. Современные технологии 3D-печати армированных композитов 121
Селицкий А. О.*, *Ухарцева И. Ю. Металлополимерные сплавы в авиакосмической отрасли: современное состояние и перспективы развития..... 124
Васильев Л. С.*, *Никифоров И. П. Амплитудно-частотный анализ расточных оправок 127
Дуб У. А.*, *Бобрышева С. Н. Проблемы рециклинга композиционных материалов..... 130

Пермяков Д. В.*, *Бобарикин Ю. Л. Методы определения изгибной жесткости металлокорда 132
Мельников Н. Н.*, *Бобарикин Ю. Л. Изгибная жесткость металлокорда для оценки работы шины 135
Романюк Н. Н.*, *Жаранов В. А. Оптимизация литниковых систем с фильтрационными узлами для бездефектного литья сложных решетчатых макроструктур: интеграция CAD-параметризации и CAE-верификации 139
Колесник С. С.*, *Жаранов В. А. Управление режимами предварительного подогрева лома для электроплавки на основе комплексного анализа состава и свойств 143
Вечерко И. О.*, *Жаранов В. А. Оптимизация схемы расположения газокислородных горелок в дуговой сталеплавильной печи на базе экспресс-CFD-моделирования 147
Невзорова О. С.*, *Бойко А. А. Получение люминесцентных порошков оксида лютеция, активированного ионами эрбия, и изучение их свойств 152
Кузнецов А. Ю.*, *Рогов С. В. Восстановление деталей машин наплавлением сверхпрочных сплавов 155
Старовойтов И. П.*, *Левкина А. Д. Металлическая пена в экстремальных условиях машиностроения 157
Горбачев М. А.*, *Левкина А. Д. Проблема переработки вулканизированных эластомеров и концепция полностью рециклируемых автомобильных шин 160
Бубнов В. М.*, *Астапенко И. В. Анализ влияния температуры непрерывнолитых заготовок при горячем посаде на качество проката 163
Астапенко А. И.*, *Астапенко И. В. Количественный анализ микроструктуры сфероидизированной стали ШХ-15 методами машинного обучения 166
Астапенко А. И.*, *Астапенко И. В. Применение искусственного интеллекта для анализа влияния технологических параметров непрерывной разливки рельсовой стали на качество проката 169

Секция III. ЭНЕРГЕТИКА

Янчук В. В.*, *Романюк В. Н. Системная экономия топлива при утилизации сбросных тепловых потоков на промышленно-отопительных ТЭЦ 173
Бутенко В. Ю.*, *Кашуба Н. А.*, *Жолнерович И. А. Использование солнечной энергии и тепловых насосов для энергоснабжения жилых домов 176
Кировский К. Д.*, *Петюлевич Е. Е.*, *Некало И. А. Теплонасосные установки с аккумуляторами тепловой энергии 179
Берсенев А. В.*, *Зеленькевич А. И. Особенности работы вакуумной индукционной печи как нелинейной электрической нагрузки 183
Ареховская М. А.*, *Макеева Е. Н. Исследование воспламеняемости и цетанового числа топливных композиций, полученных из дизельных дистиллятов 186
Сиваков В. В., Журавлев И. К., Овсянник А. В. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода и их термодинамические циклы 188
Кононович А. В.*, *Чернейко Б. В.*, *Кидун Н. М. Современные методы прогнозирования технического состояния полиэтиленовых газопроводов 192

Чернейко Б. В.*, *Кононович А. В.*, *Вальченко Н. А. Гидравлический анализ системы оборотного водоснабжения ТЭЦ 194
Колмачева П. С.*, *Никулина Т. Н. Модульная CO_2 – теплонасосная установка для утилизации сбросного тепла ЦОД РУП «Белтелеком» 196
Колмачева П. С.*, *Овсянник А. В. Экспериментальные исследования теплообмена при конденсации паров озонобезопасных хладагентов R404A, R410A и R407C на оребренной поверхности. Сравнительный анализ 199
Шутов Д. Г.*, *Овсянник А. В. Гидродинамика и теплообмен при конденсации паров озонобезопасного хладагента R410A на оребренной поверхности 202
Короткевич Д. В.*, *Рудченко Г. А. Цифровые технологии и искусственный интеллект как драйверы повышения эффективности, устойчивости и адаптивности современных энергетических систем 208
Сыбатова К. С., Рудченко Г. А. Использование технологий улавливания и хранения CO_2 в обеспечении устойчивого развития энергетической отрасли 209
Муравьева М. В.*, *Макеева Е. Н. Сезонные изменения показателей надземных и подземных вод Гомельской области 212
Грицкова К. В.*, *Махов Н. С.*, *Секацкий Д. А. Использование кинетических накопителей энергии в логистической инфраструктуре Беларуси и выбор их оптимальной конфигурации 214
Лесота А. Н.*, *Карпейчик Д. А.*, *Субоч Я. А.*, *Макаренко Н. С.*, *Секацкий Д. А. Разработка методики оценки остаточного ресурса изоляции по величине солевых отложений на изоляторах распределительных сетей 218
Савченко А. Ю.*, *Добродей А. О. Применение программного обеспечения для анализа перенапряжений в электрической сети 6 кВ 221
Чирко Д. В.*, *Лычев П. В. Повышение надежности электроснабжения потребителей на основе автокластерных распределительных электрических сетей 223
Киречко А. С.*, *Алферова Т. В.*, *Жуковец С. Г. Комплексное решение задач по электроснабжению потребителей на основе быстровозводимых электрических сетей 226
Спитальников В. М.*, *Капанский А. А. Закономерности формирования газопотребления региональной системы газоснабжения от временных условий 229
Чухар А. А.*, *Капанский А. А. Анализ и классификация аварийных режимов в системе водоснабжения на основе данных мониторинга давления 232
Подвойский Н. А.*, *Широков О. Г.*, *Алферова Т. В. Влияние отклонений питающего напряжения на освещенность рабочей поверхности светодиодными лампами 234
Лабушев П. Н.*, *Широков О. Г.*, *Алферова Т. В. Показатели несинусоидальности напряжения и тока при питании газоразрядных светильников с электронной пускорегулирующей аппаратурой 237
Козлов И. А.*, *Жуковец С. Г. Генерирующие мощности для жилого микрорайона г. Гомеля 240
Сысоева Д. Ю., Сычёв А. В. Использование накопителей электроэнергии на базе CAES-технологий 243
Ходыко П. А.*, *Алферова Т. В.*, *Жуковец С. Г. Применение беспилотных летательных аппаратов для диагностирования оборудования объектов электроэнергетики 244

Марков В. А., Капанский А. А. Исследование эффективности применения медианной фильтрации в телеметрических сигналах 247
Гончаров И. М., Широков О. Г. Требования нормативно-технических документов к значениям показателей качества электрической энергии и возможности их измерения прибором Ресурс-UF2 250
Савицкий А. А., Сычёв А. В. Анализ возможностей использования платформы nanoCAD для проектирования схем электрических сетей....253
Ляховец Н. В., Савкова Т. Н., Кравченко А. И. Исследование характристик эффективной синей освещенности светодиодных источников света 255

Секция IV. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И СВЯЗЬ

Долгов Я. В., Судаков Д. Е. Применение машинного обучения для декодирования ЭМГ-сигналов в протезировании верхних конечностей 259
Евстигнеева Е. П., Любавина М. А., Долгов Я. В., Фролова Т. А. Прототип таблетницы для слабовидящих с функцией голосового оповещения....261
Макаровский М. А., Швецов А. Н. Модернизация системы управления теплоснабжающим объектом на базе SCADA-системы....264
Ходина В. Д., Маныкина Е. А., Шашок В. Н. Широкополосный трансформатор сопротивлений 50–75 Ом 267
Худзик А. А., Ходина В. Д. Цифровой БИХ-фильтр с повышенной линейностью фазочастотной характеристики 269
Маныкина Е. А., Ридецкая Е. С., Шашок В. Н. Эквиваленты антенн и их развитие....272
Сацура В. А., Погуляев М. Н. Интеллектуальные методы оптимизации управления электроприводами 274
Чжан Чжунбинь, Савельев В. А. Алгоритмы управления матричными преобразрвателями частоты, повышающие энергоэффективность электропривода....276
Чжан Лифан, Савельев В. А. Повышение энергоэффективности удаленного мониторинга промышленного оборудования....278
Назарчук В. Е., Савельев В. А. Система распознавания жестов для управления роботом Unitree Go2 Edu на базе компьютерного зрения и ROS2 281
Белоусов А. А., Погуляев М. Н. Повышение энергоэффективности экзоскилета....283
Белоусов А. А., Савельев В. А. Аппаратно-программная реализация лабораторного стенда «Аниматронная система»....285
Яо Бинь, Погуляев М. Н. Повышение энергоэффективности нагрузочных испытаний дизель-генераторных установок тепловоза....288
Шашок И. С., Шаповалов П. С. Взаимодействие двух некогерентных пучков в нелинейных средах....291
Цзя Шусян, Погуляев М. Н. Управляемые выпрямители в устройствах нагружения синхронных генераторов резервных источников питания 293
Ли Дэцян, Кудин В. П. Методы решения граничных задач электродинамики для анализа многоэлементных антенных решеток на крупных летательных аппаратах и морских судах: краткий обзор 295
Головач К. А., Брель В. В. Аппаратно-программная реализация мобильной робототехнической платформы с системой технического зрения для задачи следования за объектом 298

Шабетник Д. А.*, *Проневич О. И. Созданипе и модернизация самодельной акустической системы на базе микросхемы TPA3255 с автономным питанием 299
Крышнеў С. Ю.*, *Блыхін І. У.*, *Крышнеў Ю. В.*, *Буракова М. У. Спектральны аналіз і верыфікацыя інтанацыйных контураў пры апаратна-праграмнай рэалізацыі сінтэзатара маўлення 302
Крышнеў С. Ю.*, *Блыхін І. У.*, *Крышнеў Ю. В.*, *Буракова М. У. Праграмная рэалізацыя вакодэра І мікшыраванне сегментных і суперсегментных кампанентаў пры сінтэзе маўлення 305
Тимофеенко В. С.*, *Туровец Н. В.*, *Запольский А. Е. Максиселектор питания от стационарной электросети и фотоэлектрического преобразователя 309
Антоненко А. А.*, *Крышнев Ю. В.*, *Красовская Н. А.*, *Запольский А. Е. Современный кризис оперативной памяти и технологические стратегии выхода 312
Рождаев С. Е.*, *Виноградов Э. М. Микроконтроллерный регистратор температуры с графическим жидкокристаллическим дисплеем 315
Роговой Д. А.*, *Литвинов Д. А. Лифтовая панель с системой голосового управления 317
Санец Д. С.*, *Антоненко А. А.*, *Запольский А. Е. Платформа для иностранных абитуриентов с применением технологий AI 320
Feng Naifan*, *Kryshneu Yu. V. From traditional to intelligent: an iot-based intelligent monitoring and evaluation system for dissolved oxygen in watershed water environment 324
Федорович А. В.*, *Шлыков А. Э.*, *Крышнев Ю. В.*, *Запольский А. Е. Проект учебного центра по технологиям искусственного интеллекта с использованием удаленных серверов с технологией локального запуска AI 326
Проскуряков М. А.*, *Крышнев Ю. В. Автоматизированная система регистрации сварочных процессов 329
Горст В. А.*, *Запольский А. Е. Изучение динамических характеристик зрения 332
Ракицкий Т. А.*, *Крышнев Ю. В. Решение прикладных задач оптимизации производства электронной техники на основе моделей линейного программирования 334
Колесник Д. С.*, *Суторьма Ив. Иг.*, *Карпов В. А.*, *Захаренко Л. А. Индукционный металлодетектор для кормоуборочной техники: принцип действия и схемотехническая реализация 339
Рагавы Дз. А.*, *Літвінаў Дз. А.*, *Крышнеў Ю. В. Схематэхнічная рэалізацыя вузлоў інтэрфейснага спалучэння і блока сілкавання інтэлектуальнай ліфтавой панэлі 341
Калеснік Дз. С.*, *Сутарма Ів. Іг.*, *Карпаў У. А.*, *Захаранка Л. А.*, *Крышнеў Ю. В. Эксперыментальныя даследаванні і напрамкі ўдасканалення індукцыйнага металадэтэктара кармазбіральнага камбайна 344

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОКОРДА КАК ЗАЛОГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА

Ю. В. Мартьянов, Ю. Л. Бобарикин

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

Показаны пути повышения качества металлокорда. Обозначена важность повышения качества продукции для обеспечения технологического суверенитета. Выполнено моделирование свивки металлокорда, выполнена имитация разрыва металлокорда для определения агрегатной прочности. Даны результирующие выводы о возможностях повышения качества металлокорда в направлении повышения прямолинейности и увеличения агрегатной прочности.

Ключевые слова: металлокорд, моделирование, напряжения, прочность, прямолинейность.

Металлокорд представляет собой витое изделие из стальной проволоки диаметром в диапазоне от 0,1 до 1 мм, используемое в качестве армирующего элемента при изготовлении автомобильных шин и резиновых полотен. Наиболее распространенный класс прочности НТ производится из стали 80.

Высокое качество национального продукта обеспечивает технологический суверенитет в метизной отрасли производства. Это означает, что технологии находятся на высоком уровне и позволяют использовать собственные разработки и компетенции для достижения требуемых параметров металлокорда. К качественным характеристикам металлокорда можно отнести механические и технологические свойства, в частности: отклонение от прямолинейности, агрегатную прочность, относительную обрывность.

Существующие технологические методы получения высокопрочного металлокорда, включающие волочение проволоки на волочильных станах и свивку металлокорда из проволоки на канатных машинах, не обеспечивают достижения требуемого показателя отклонения от прямолинейности металлокорда, который должен составлять менее 80 мм на длине 600 мм. Данное ограничение оказывает негативное влияние на процессы автоматизации производства автомобильных шин: из-за несоответствия прямолинейности металлокорда установленным требованиям автоматические линии вынуждены переводиться в ручной режим работы, что приводит к существенному снижению производительности.

Основной причиной отклонения от прямолинейности металлокорда выступают остаточные напряжения, формирующиеся в металлической структуре на этапах волочения проволоки и свивки металлокорда из отдельных проволок. Для снижения показателя отклонения от прямолинейности в современной практике применяются технические и технологические решения, основанные на регулировании изгиба и натяжения при волочении проволоки, а также на контроле изгиба металлокорда в процессе свивки. Тем не менее эффективность данных методов ограничена ввиду отсутствия учета неравномерности распределения остаточных напряжений по сечению как отдельной проволоки, так и всего металлокорда в целом, игнорирования влияния

суммарных напряжений, возникающих в конструкции металлокорда, и отсутствия учета макроперемещений отдельных проволок внутри конструкции металлокорда при его свивке.

Обеспечение низкого показателя отклонения от прямолинейности металлокорда представляет собой актуальную научно-техническую задачу, обусловленную жесткими требованиями современных компаний-потребителей. Несоответствие металлокорда заданным параметрам влечет за собой предъявление рекламаций со стороны заказчиков. Перечисленные последствия создают дополнительную нагрузку на предприятие-производитель, снижая экономическую эффективность производства и ухудшая его репутацию на международном рынке.

Актуальной является проблема повышения агрегатной прочности металлокорда. Агрегатная прочность металлокорда означает его сопротивление разрушению при осевом растяжении как единой витой конструкции. Низкая агрегатная прочность означает необходимость увеличивать полезное сечение металлокорда за счет увеличения количества проволок или их диаметра. Это означает более высокую материалоемкость и, как следствие, более высокую массу конечного изделия.

Производство высокопрочного металлокорда относится к метизному производству (четвертый металлургический передел). Основной заготовкой для метизного производства является катанка диаметром от 4 до 10 мм. Для производства высокопрочного металлокорда катанка подвергается очистке, промывке, нанесению подсмазочного слоя, грубому волочению (в современном производстве чаще прибегают к грубо-среднему волочению) до диаметра 1–1,5 мм, конвективному патентированию–латунированию (термообработка [1, с. 5] и нанесению латунного слоя химико-термическим способом), тонкому (мокрому) волочению [2] на волочильных станах со скольжением до предельного диаметра 0,1 мм, свивке на канатных машинах двойного кручения.

Окончательный комплекс механических свойств формируется на этапе тонкого волочения. На этапе тонкого волочения производится тонкая проволока. К тонкой проволоке относится проволока диаметром от 0,1 до 1 мм. Наиболее распространенным диаметром является 0,3 мм. Удельная доля производства такой проволоки в Республике Беларусь составляет около 80 %. Высокопрочная проволока класса прочности НТ (High Tensile) имеет предел прочности около 3000 МПа. такой уровень прочности достигается за счет большой вытяжки на волочильном стане со скольжением и упрочнении проволоки за счет деформации [3].

Особенно важно отметить, что от свойств тонкой проволоки зависит качество металлокорда, свитого из этой проволоки.

Из высокопрочной тонкой проволоки производится высокопрочный металлокорд. Высокопрочный металлокорд широко используется в шинной промышленности в качестве армирующего элемента для резиновых полотен и резиновых покрышек. Высокопрочный металлокорд в современном метизном производстве чаще всего получают на канатных машинах двойного кручения.

Вследствие пластической деформации проволоки в процессе волочения возрастает предел прочности, уменьшается относительное удлинение, снижается ударная вязкость. Как следствие, снижается пластичность металла проволоки [4–6, с. 93–95; 7, с. 99–103].

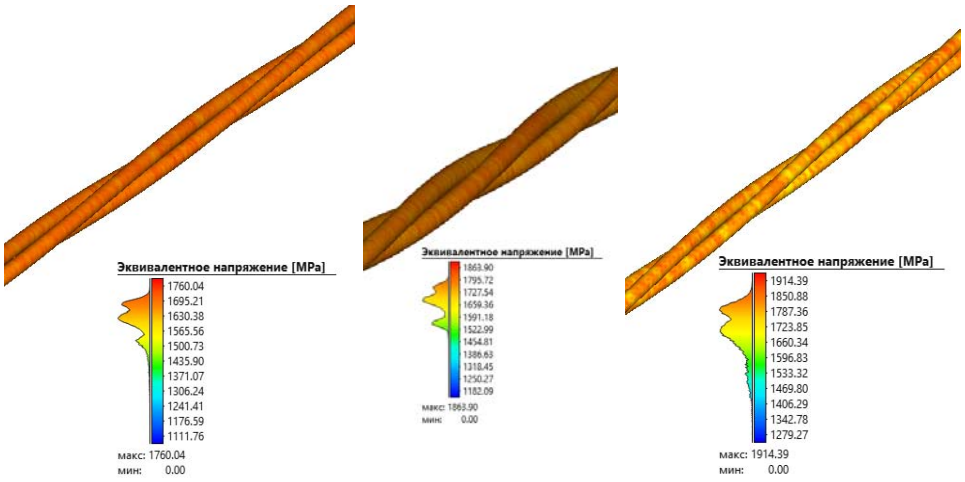
Для исследований причин несоответствия качественных характеристик металлокорда целесообразно применять численные теоретические методы моделирования с использованием компьютерных систем.

В рамках исследования отклонения от прямолинейности металлокорда и агрегатной прочности металлокорда построены численные модели свивки однослойных конструкций металлокорда на базе трех проволок: 3 × 0,25 НТ; 3 × 0,30 НТ; 3 × 0,35 НТ. Численные модели учитывают контактное взаимодействие проволок в конструкции. Модель материала проволок учитывает особенности пластической деформации при свивке, а также содержит модель повреждений Джонсона–Кука.

Моделирование произведено со следующими параметрами:

• Количество элементов сетки обще – 174 тыс.
• Натяжение проволок при свивке – 40 Н.
• Частота вращения ротора – 3000 об/мин.
• Шаг свивки – 15 мм.
• Материал – Сталь 80.

Параметры свивки приближены к действующим параметрам свивки на реальном производстве металлокорда. Свивка проволок выполнена на двух шагах металлокорда. Результаты свивки представлены на рис. 1.



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Результаты свивки металлокордов:
а – 3 × 0,25 НТ; *б* – 3 × 0,30 НТ; *в* – 3 × 0,35 НТ

Построена модель имитации растяжения металлокорда до полного разрыва всей конструкции металлокорда. Разрушение материала подчиняется классическим законам пластического течения материала.

Диаграмма растяжения металлокорда приведена на рис. 2.

Диаграмма растяжения демонстрирует, что разрыв проволок происходит неравномерно, неодинаково. Проволоки разрушаются по очереди. При разрушении одной проволоки в конструкции остальные проволоки несколько смещаются, выпрямляются, что увеличивает общий показатель относительного удлинения металлокорда.

Учитывая, что диаграмма растяжения похожа на классическую диаграмму растяжения металла, а характер разрушений полностью соответствует классическим положениям, можно утверждать, что построенная модель растяжения однослойного металлокорда адекватна.

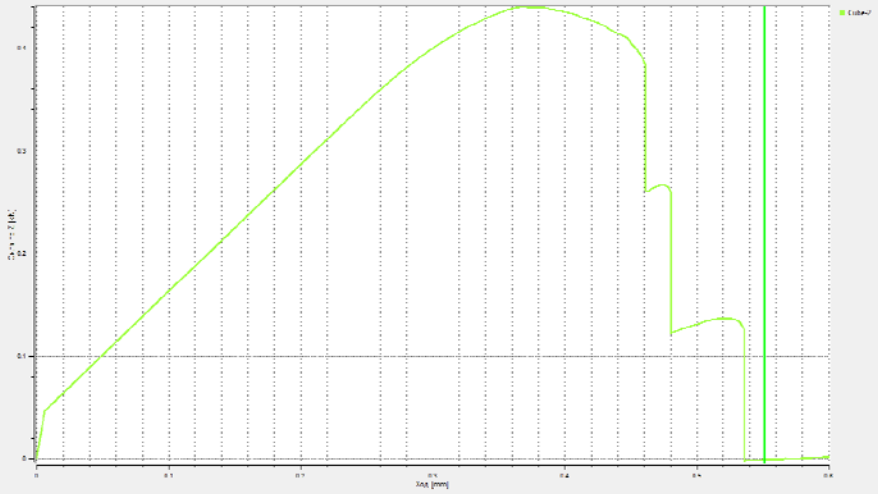


Рис. 2. Диаграмма растяжения металлокорда

При скручивании проволок происходит изгиб и кручение. Деформация распределена неравномерно, пики деформации расположены в местах, где проволоки контактируют друг с другом. Максимальные эффективные напряжения при свивке проволоки в металлокорд составляют 685 МПа.

На второй стадии, когда конструкция металлокорда с избыточной деформацией возвращается обратным кручением к требуемому состоянию скручивания и шага спиральной линии проволоки, видно, что напряжения в проволоках изменяются по модулю и расположению, а деформация снижается. Это частично обусловлено контактным взаимодействием проволок в конструкции металлокорда [8].

Остаточные напряжения в проволоках после свивки распределены достаточно равномерно по поверхности. При этом максимальные остаточные напряжения проявляются на поверхности проволоки, максимально удаленной от оси свивки. Максимальные остаточные напряжения составляют 1850 МПа (69 % – от эффективных напряжений), минимальные остаточные напряжения составляют 1180 МПа (7,5 % – от эффективных напряжений).

Исследования показали, что после волочения максимальные остаточные напряжения находятся в зоне 0,69R. После свивки (I стадия) максимальные эквивалентные напряжения расположены равномерно по всей длине шага свивки металлокорда. После свивки и имитации торсионного устройства (II стадия) максимальные остаточные напряжения расположены в зоне поверхности проволоки, наиболее удаленной от оси свивки.

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

Для повышения прямолинейности металлокорда необходимо использовать дополнительные роликовые устройства, расположенные в узле намотки канатной машины и обеспечивающие обратный контролируемый изгиб конструкции металлокорда перед намоткой на катушку. Это позволяет уменьшить градиент остаточных напряжений и изменить картину контактных взаимодействий между проволоками в конструкции металлокорда. Проволоки блокируют смещения, таким образом, вся конструкция металлокорда находится в некотором защемлении, что обеспечивает прямолинейность металлокорда на макроуровне.

По результатам исследований определено, что в однослойных конструкциях металлокорда диаметр проволок влияет на агрегатную прочность в незначительной степени в конструкции из трех проволок. Это связано с тем, что конструкция из трех проволок симметрична относительно геометрического центра и центра массы металлокорда. Ожидается, что в многослойных конструкциях диаметр будет влиять на агрегатную прочность в большей степени по причине смещения центров массы и оси симметрии конструкции.

Литература

1. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н. И. Яловой, М. А. Тылкин, П. И. Полухин, Д. И. Васильев. – М. : Высш. шк., 1973. – 631 с.
2. Харитонов, В. А. Состояние и направления развития волочения проволоки в монолитных волоках / В. А. Харитонов, М. Ю Усанов, Н. Ю. Сметнева // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). – 2019. – Т. 17, № 9. – С. 411–417.
3. Бреславцева, И. В. Напряженно-деформированное состояние проволок каната при свивке и метод расчета параметров преформаторов : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.03.05 / Бреславцева Ирина Валентиновна ; Южно-Рос. гос. техн. ун-т / Новочерк. политехн. ин-т. – М., 2007. – 19 с.
4. Харитонов, В. А. Повышение комплекса механических свойств стальной проволоки на основе разработки совмещенно-комбинированного способа волочения / В. А. Харитонов, Д. Э. Галлямов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2016. – № 1 (44). – С. 43–48.
5. Харитонов, В. А. Управление напряженно-деформированным состоянием в стальных канатах / В. А. Харитонов, А. И. Зайнуллин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 22–25.
6. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : учеб. для студентов вузов / Н. Н. Малинин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.
7. Касаткин, Б. С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справ. пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов. – Киев : Наукова Думка, 1981. – 581 с.
8. Бобарикин, Ю. Л. Влияние параметров деформации металлокорда перед намоткой на его прямолинейность после намотки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2019. – № 1 (76). – С. 50–55.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНОГО И ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В ТУРИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

И. В. Ермонина

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

Развитию туризма в стране придается большое значение. Рассмотрены находящиеся в лесном фонде объекты природного и историко-культурного наследия, их комплексная оценка по предложенным показателям. Особое внимание уделено необходимости применения этой оценки для расчета коэффициента экскурсионной ценности объектов, которые включены в экологический маршрут. Это позволяет дифференцированно подходить к определению стоимости экскурсии по маршруту в зависимости от выбранных объектов туристского показа.

Ключевые слова: лесной фонд, объекты, природное наследие, историко-культурное наследие, комплексная оценка, туристическая деятельность.

В настоящее время развитие туризма в Республике Беларусь осуществляется динамично: растут объемы оказания туристических услуг, появляются новые средства размещения туристов, открываются новые туристические маршруты. В стране

туристическую деятельность на конец 2024 г. осуществляло 1108 организаций. Их услугами воспользовалось 2,7 млн организованных туристов и экскурсантов, в том числе 882 тыс. туристов и 1,8 млн экскурсантов, а 1,7 млн граждан Республики Беларусь путешествовали по турам в пределах страны, при этом в однодневных туристических поездках (экскурсиях) побывало 1,6 млн человек, а в многодневных поездках – только 137,8 тыс. туристов [1].

С 2021 г. в Беларуси наблюдается значительное увеличение численности обслуженных посетителей туристическими организациями за счет развития внутреннего туризма, а с 2022 г. – въездного туризма.

Наметилась положительная динамика роста количества домов охотника и рыбака, охотничьих комплексов лесохозяйственных учреждений (лесхозов) из-за увеличения спроса на их услуги по размещению, охоте, рыбалке и экологическому туризму. В 2020 г. их количество было на уровне 131 ед., а в 2024 г. – 138. Число субъектов агроэкотуризма в 2020 г. составило 2936 ед., а в 2024 г. – 1408 и их услугами воспользовалось 427,6 тыс. человек, из них 413,6 тыс. человек – граждане Республики Беларусь.

По результатам построения Вспомогательного счета туризма Республики Беларусь вклад сферы туризма в ВВП за 2022 г. составил 1,9 % [2]. Динамика этого показателя изменялась с 2016 г. от 2,2 до 2,5 % – в 2018 г. и 1,4 % – в 2020 г. [3].

Указом Президента Республики Беларусь от 10.09.2025 г. № 329 «О совершенствовании государственного управления в сфере туризма» определены главные задачи на ближайшую пятилетку – повышение вклада туризма в экономику страны почти в 2 раза, достижение его доли в ВВП не менее 4,5 % в 2030 г. за счет продвижения туристического потенциала Республики Беларусь на внешнем и внутреннем туристических рынках и ориентация на развитие туризма как приоритетного вида экономической деятельности.

Особое место в сфере туризма занимает экологический туризм, под которым подразумевается отдых в рекреационно-привлекательных регионах, мало нарушенных человеческой деятельностью. В стране такой вид туризма наиболее распространен на особо охраняемых природных территориях.

Нужно отметить, что на территории лесного фонда республики находятся уникальные природные, исторические достопримечательности, ландшафты, богатый растительный и животный мир. Многообразие природных объектов открывает широкие возможности для создания экологических маршрутов, туров с разнообразной программой на основе использования объектов природного и историко-культурного наследия, расположенных в лесном фонде: ландшафтов, геологических образований (валуны, ледниковые конгломераты), водных экосистем (озера, реки, водохранилища, родники), болот, памятников природы, уникальных участков леса, вековых деревьев, флоры, фауны, древнейших исторических образований (каменные кресты, городища, места стоянок первобытного человека) и других объектов, соединяющих в себе природную и историческую ценность, с которыми связаны мифы, легенды, предания, древние обычаи и традиции.

Учитывая, что значительная часть уникальных природных ландшафтов, разнообразных объектов находится в лесах, которые в большей части не выявлены, не изучены и не задействованы в системе экотуризма, проблема выявления, описания и комплексной оценки туристических объектов в лесном фонде для экотуризма весьма актуальна.

Цель проведенного исследования – изучение возможности использования результатов комплексной оценки объектов природного и историко-культурного наследия, находящихся на территории лесного фонда, расчет стоимости посещения экотуристами туристических маршрутов.

Научные работы выполнялись для лесхозов Брестской, Гомельской [4] и Могилевской областей [5] путем проведения натурных исследований в лесном фонде с использованием лесоустроительной информации, сбора сведений местных жителей об уникальных объектах лесного фонда, изучения литературных источников по истории, культуре, природных особенностях исследуемой территории. При этом учитывались разработанные А. И. Локотко [6] локальные районы комплексного историко-культурного наследия, определенные на основе анализа природно-ландшафтной среды, системы расселения, коммуникаций, особенностей застройки поселений, традиционной материальной и духовной культуры и других факторов в областях, а также предложенные этим ученым историко-культурные ландшафты Беларуси.

К объектам природного и историко-культурного наследия в лесном фонде относятся те объекты, которые могут быть использованы как объекты туристского показа при проведении экскурсий по туристическим маршрутам, которые можно объединить в следующие категории [7]:

– крупные природные территориальные комплексы, включающие в себя разнообразные объекты природного и историко-культурного наследия;

– объекты археологии, архитектуры, садово-паркового строительства, расположенные на территории лесного фонда (городища, замчища, курганы, старинные дворцовые и парковые комплексы, усадьбы, именные дендропарки);

– исторические объекты (мемориалы, памятники, памятные знаки, памятные места, связанные с историческими событиями);

– лесные объекты и объекты лесохозяйственной деятельности (девственные леса, высоковозрастные, высокопродуктивные, редкие по ценотическому и видовому составу лесные насаждения, уникальные деревья, участки леса (лесные дачи), связанные с деятельностью лесоводов, объекты классических лесных исследований);

– природные объекты и ландшафты в лесном фонде, связанные с народными традициями, культурой, историческими событиями (именные урочища, озера, родники и малые реки, ритуальные деревья, каменные кресты и т. п.).

Комплексная оценка объектов природного и историко-культурного наследия в лесном фонде осуществлялась в следующей последовательности: оценка по качественному значению (по группам); оценка содержания (одноплановые, многоплановые); оценка функционального значения (основные и дополнительные); оценка познавательной ценности (достоинства); оценка известности (популярности среди населения); оценка специфичности (экологическая, экономическая и научная ценность); оценка выразительности (взаимодействие с окружающими объектами); оценка сохранности (состояния); оценка надежности (устойчивости к антропогенным нагрузкам); оценка местонахождения (удобство доступа туристов); оценка временного ограничения показа (сезон, месяц, день, сутки); оценка направленности на тип экскурсантов (местные, въездные группы).

Для проведения комплексной оценки объектов использовались разработанные показатели для оценки ландшафтных рекреационных ресурсов, лесных рекреационных ресурсов и историко-культурных объектов [8]. По каждому из 12 критериев оценки (качественное значение, содержание, функциональное назначение, познавательная ценность, известность; специфичность, необычность; выразительность,

сохранность, надежность, местонахождение, временное ограничение показа, направленность на тип экскурсантов) устанавливались оценочные баллы по показателям на основе шкал. При этом низшая оценка объекта экотуризма по критерию – 1 балл, высшая – 5 баллов. Пример показателей по критерию оценки «специфичность» приведен в табл. 1.

Таблица 1

Шкала оценки специфичности

Цена балла	Название баллов для объектов наследия	
	Природного	Историко-культурного
1	Эстетическая ценность	Оригинальность
2	Экономическая ценность	Эстетическая ценность
3	Экологическая ценность	Историко-культурная ценность
4	Научная ценность	Научная ценность
5	Эколого-экономическая и научная ценность	Уникальность памятника истории и культуры

Общий балл комплексной оценки объекта рассчитывается по формуле (1):

$$P_o = P_1 + P_2 + P_3 + ... + P_{12}, \quad (1)$$

где P_o – общий балл комплексной оценки объекта; P_1, P_2, P_3, ..., P_{12} – оценки объекта в баллах по критериям.

Результаты комплексной оценки объектов природного и историко-культурного наследия в лесном фонде одного из лесхозов Могилевской области даны в табл. 2. Они могут использоваться с целью определения экскурсионной ценности объектов при разработке туристических маршрутов и обоснования стоимости экскурсий по ним.

Таблица 2

Результаты комплексной оценки объектов природного и историко-культурного наследия в лесном фонде ГЛХУ «Белыничский лесхоз»

Название объекта	Максимальный балл	Общий балл	Отклонение от максимального балла	Процент отклонения от максимального балла
Природные объекты				
1. Святая криница (н. п. Майск)	60	40	20	33,3
2. Дендропарк лесхоза (Осовецкое лесничество, около автодороги М4)	60	45	15	25,0
3. Гидрологический заказник местного значения по торфяным месторождениям «Ясень»	60	38	22	36,7

Окончание табл. 2

Название объекта	Максимальный балл	Общий балл	Отклонение от максимального балла	Процент отклонения от максимального балла
4. Республиканский гидрологический заказник «Заозерье»	60	35	25	41,7
Средний балл по природным объектам	60	40	21	35,0
Историко-культурные объекты				
1. Штаб партизанского соединения «13» под командованием Героя Советского Союза С. В. Гришина. (н. п. Эсьмоны)	60	40	20	33,3
2. Каменный крест (н. п. Заозерье)	60	45	15	25,0
3. Камни с таинственными знаками (н. п. Заозерье)	60	38	22	36,7
4. Археологический памятник раннего железного века (н. п. Лямница)	60	42	18	30,0
Средний балл по историко-культурным объектам	60	41	19	31,7
Средний балл по объектам природного и историко-культурного наследия	60	41	19	31,7

Рассчитывается коэффициент экскурсионной ценности объектов, которые включены в экологический маршрут (формула (2)):

$$K_{\text{Эц}} = \frac{\sum_i P_{\text{о}}}{\sum_i P_{\text{м}}}, \qquad (2)$$

где $K_{\text{Эц}}$ – коэффициент экскурсионной ценности объектов; i – количество оцениваемых объектов; $P_{\text{о}}$ – общий балл оценки объекта; $P_{\text{м}}$ – максимальный балл оценки объекта (60).

Стоимость экскурсии по экологическому маршруту с учетом коэффициента экскурсионной ценности объектов рассчитывается следующим образом (пример расчета): стоимость экскурсии без коэффициента (93 руб. за 1 ч · 8,6 ч = 799,80 руб.). Максимальный доход (50 %) от экскурсионной ценности объектов на маршруте (399,90 руб.) × × коэффициент экскурсионной ценности объектов по экологическому маршруту (0,622) = = 248,74 руб. Стоимость экскурсии по экологическому маршруту на 1 взрослого человека с учетом коэффициента экскурсионной ценности объектов = 248,74 руб./12 человек = = 20,73 руб., а с учетом НДС 20 % = 20,73 руб. · 1,2 = 24,88 руб. С учетом посещения музея, предоставления услуги проката и обеда в ресторане (кафе) = 24,88 руб. + стоимость посещения музея (15 руб. на 1 человека), услуга по прокату мангала (15 руб. за 1 ч) и обед в ресторане (кафе) (20 руб.) = 74,88 руб.

При организации экологических экскурсий следует отбирать не более 15–20 объектов природного и историко-культурного наследия, так как перегрузка большим количеством посещаемых объектов увеличивает ее длительность и вызывает утомляемость экскурсантов, а их внимание и интерес при этом ослабевают. Не рекомендуется

включать в показ объекты природного и историко-культурного наследия, не связанные с экскурсионной темой, поскольку они отвлекают внимание экскурсантов и нарушают стройность экскурсии. В целях привлечения туристов на экологические маршруты рекомендуется дополнение существующих объектов природного и историко-культурного наследия на маршрутах искусственно созданными развлекательными и познавательными объектами. Для активизации посещения туристами туристических маршрутов рекомендуется проведение постоянной рекламной компании объектов наследия, многодневных экологических туров, участия лесхозов в туристических выставках, издание рекламной продукции, а также сотрудничество лесхозов с туроператорами, расширение спектра дополнительных услуг (услуги проката, торговля, питание) и соответствие их цены и качества [9–11].

Литература

1. Статистика туризма/Экономическая статистика/Главная/База статистических данных (ИАСБД) / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2026. – URL: https://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/10616 (дата обращения: 12.01.2026).
2. Туризм и туристические ресурсы в Республике Беларусь : стат. буклет. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2025. – 32 с.
3. Туризм и туристические ресурсы в Республике Беларусь : стат. буклет. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2023. – 28 с.
4. Ермонина, И. В. Обследование объектов природного и историко-культурного наследия в лесном фонде Гомельской области / И. В. Ермонина // Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию МГУ им. А. А. Кулешова, г. Могилев, 20–22 февр. 2013 г. / Могилев. гос. ун-т им. А. А. Кулешова ; под общ. ред. Т. Ю. Герасимовой, Д. В. Киселевой. – Могилев, 2013. – С. 340–342.
5. Ермонина, И. В. Оценка туристического потенциала лесного фонда Могилевской области / И. В. Ермонина // Цифровизация: экономика и управление производством : материалы 88-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 29 янв. – 16 февр. 2024 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за изд. И. В. Войтов. – Минск, 2024. – С. 231–234.
6. Туристическая мозаика Беларуси / А. И. Локотко, О. Н. Князева, Е. В. Морозов, О. В. Изотова ; науч. ред. А. И. Локотко. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 640 с.
7. Ермонина, И. В. О сохранении историко-культурного наследия, связанного с лесами и лесным хозяйством / И. В. Ермонина // Менталитет славян и интеграционные процессы: история, современность, перспективы : сб. науч. тр. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого [и др.] ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель, 2023. – С. 44–47.
8. Ермонина, И. В. Комплексная оценка объектов природного и историко-культурного наследия на территории лесного фонда / И. В. Ермонина // Труды БГТУ. – № 7. Экономика и управление. – 2015. – Вып. 180. – С. 116–119.
9. Ермонина, И. В. Методические основы организации экологических туров в лесоохотничьих хозяйствах / И. В. Ермонина // Труды БГТУ. Серия 7. Экономика и управление. – 2013. – Вып. 163. – С. 84–88.
10. Ермонина, И. В. Информационное обеспечение экологического туризма в лесном хозяйстве / И. В. Ермонина // Цифровизация: экономика и управление производством : материалы 88-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 29 янв. – 16 февр. 2024 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за изд. И. В. Войтов. – Минск, 2024. – С. 227–231.
11. Ермонина, И. В. Об эффективном использовании туристического потенциала лесного фонда для развития экологического туризма / И. В. Ермонина // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2025. – Ч. 2. – С. 263–267.

АРХИТЕКТУРА ДОВЕРИЯ В ЦИФРОВЫХ КАНАЛАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЫНКОВ: МОДЕЛЬ МНОГОФАКТОРНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ПОСТАВЩИКА

В. А. Сидоркина, Е. Н. Карчевская

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

Рассмотрен процесс формирования доверия в B2B-секторе с учетом цифрового взаимодействия. Интернет-маркетинг рассмотрен не только как коммуникационный инструмент, но и как механизм снижения трансакционных издержек. Введена «матрица цифровой верификации», которая классифицирует инструменты промышленного интернет-маркетинга по направлениям функциональной полезности и визуальной привлекательности. Проведенный анализ с применением матрицы «Модерность – полезность» позволил определить стратегии дальнейшего развития.

Ключевые слова: промышленный маркетинг, B2B, доверие, цифровая верификация, утилитарность, аттрактивность, матрица.

В современных реалиях промышленный рынок (B2B) отличается сложностью товаров и длительным циклом принятия решений. На рынке стройматериалов это усугубляется информационной асимметрией: застройщик или проектировщик не могут полноценно оценить качество материала и надежность поставщика до заключения контракта и запуска объекта. В таком контексте сайты компании превращаются не просто в «витрину», а в институциональный инструмент верификации. Доверие здесь становится когнитивным – оно строится на интерпретации сигналов, идущих через цифровые каналы фирмы.

Для проведения исследования выделяются основные классификации оценки цифровых активов:

• Функциональная утилитарность – набор информационно-технологических свойств ресурса, обеспечивающих верификацию технических характеристик продукции (например, BIM-моделей, протоколов испытаний, динамических калькуляторов).

• Визуальная привлекательность – совокупность эстетических и технических характеристик (UI/UX, производительность, адаптивность), интерпретируемых контрагентом как маркеры рыночной состоятельности, инновационности и инвестиционной надежности компании.

• Цифровая верификация – многослойное подтверждение компетенций и стабильности поставщика на основе аудита его цифровой экосистемы.

На основании проведенного анализа построена матрица, классифицирующая инструменты интернет-маркетинга по осям «стимулирование рационального выбора» (утилитарность) и «формирование первичного доверия» (аттрактивность) (рис. 1).

Рис. 1. Квадранты матрицы цифровой верификации поставщика

Для внедрения понятий «степень влияния на рациональный выбор» (утилитарность) и «степень влияния на первичное доверие» (аттрактивность) разработана система количественных индикаторов (табл. 1). Оценка проводится экспертным методом по бинарной или трехуровневой шкале (0 – отсутствует, 0,5 – частично, 1 – полностью). Итоговый балл фактора рассчитывается как сумма взвешенных оценок.

Таблица 1

Показатели оценки цифровой верификации поставщика

Критерий	Индикатор	Вес, %
Утилитарность		
Техническая документация	Сертификаты, протоколы, ГОСТы в открытом доступе (≤ 2 кликов)	30
Инженерные форматы	BIM-модели, Revit, IFC, DWG для скачивания	25
Калькуляторы и подбор	Расход материала, подбор по параметрам	20
Логистическая полезность	Загрузка транспорта, остатки складов	15
Поиск и навигация	Поиск по артикулу, фильтрация, сравнение	10
Аттрактивность		
UI/UX и современность	Адаптивность, визуальный шум, типографика	35
Скорость загрузки	< 3 с (PageSpeed Insights)	20
Визуализация продукта	3D-модели, рендеры узлов, фото объектов	20
Социальные доказательства	Референс-лист, видеокейсы, отзывы специалистов	15
Интерактивность	Онлайн-чат, быстрый заказ, личный кабинет	10

Научная новизна подхода заключается в выявлении нелинейного влияния факторов аттрактивности и утилитарности на различных этапах B2B-процесса закупки. На этапе идентификации визуальная привлекательность снижает психологический барьер при взаимодействии с новым поставщиком. Во время технического аудита внимание смещается к утилитарности: отсутствие подробных технических характеристик и сертификатов в открытом доступе в 80 % случаев прерывает процесс верификации. Эти данные согласуются с исследованием 6sense и анализом Gartner, показывающими, что 81–85 % B2B-покупателей определяют требования и принимают решение до прямого контакта с продавцом [4, 5]. На стадии легитимизации решения оба фактора взаимодействуют, создавая образ «современного и надежного лидера отрасли» [6].

Таблица 2

Оценка утилитарности ресурса

Критерий	Оценка (0–1)	Обоснование
Техническая документация	1,0	Прямой доступ к сертификатам, протоколам, пожарным сертификатам
Инженерные данные	0	BIM-библиотеки, Revit-семейства отсутствуют

Окончание табл. 2

Критерий	Оценка (0–1)	Обоснование
Калькуляторы и подбор	0,5	Детальное описание свойств, но нет интерактивного калькулятора
Логистическая полезность	0,5	Нормы загрузки (вагоны/машины) есть, остатков склада нет
Поиск и навигация	0,5	Фильтрация частичная, сравнение товаров отсутствует
Итого	0,61	(1,0 × 0,30 + 0 × 0,25 +0,5 · 0,20 +0,5 × 0,15 + 0,5 × 0,10)

Таблица 3

Оценка аттрактивности ресурса

Критерий	Оценка (0-1)	Обоснование
UI/UX и современность	0,5	Консервативный дизайн, адаптивность есть, но стиль устаревший
Скорость загрузки	0,5	3–4 с, требуется оптимизация
Визуализация продукта	0	Только стандартные фото, 3D-узлы отсутствуют
Социальные доказательства	0,5	Референс-лист текстовый, без визуализации
Интерактивность	0	Онлайн-чат не работает, личного кабинета нет
Итого	0,32	(0,5 × 0,35 + 0,5 × 0,20 +0 × 0,20 +0,5 × 0,15 + 0 × 0,10)

Выявленный «разрыв верификации»:

$$\Delta = \text{утилитарность} - \text{аттрактивность} = 0{,}61 - 0{,}32 = 0{,}29. \quad (1)$$

Предприятие подтверждает качество продукта (экспертный базис), но недостаточно демонстрирует современность сервиса, что ограничивает привлечение новых партнёров. Для перемещения в квадрант III (высокая утилитарность/аттрактивность) предложены следующие меры:

1) интеграция BIM-библиотек продукции BELTEP в цифровые модели зданий (повышение инженерных форматов с 0 до 1);

2) запуск личного кабинета дилера для цифровизации документооборота и отслеживания заказов (увеличение интерактивности);

3) создание визуального репозитория реализованных объектов с фото и видео (укрепление социальных доказательств);

4) разработка 3D-визуализаций узлов конструкций типовых решений (улучшение визуализации продукта).

Таким образом, практическое применение авторской модели на примере предприятия промышленности строительных материалов подтвердило гипотезу о доминировании утилитарности для удержания контрагентов. Однако сравнительная оценка выявила значительный дефицит визуальных и сервисных сигналов (аттрактивность 0,32 против утилитарности 0,61). Для лидеров в строительной отрасли

стратегическим направлением интернет-маркетинга должна стать трансформация информационных ресурсов в сервисные экосистемы, которые минимизируют риски клиента на всех этапах проекта.

Дополнительным инструментом анализа инструментов интернет-маркетинга на предприятии может быть авторская методика с применением матрицы «Модерность – полезность» (МП) [1, 2]. Речь идет об анализе составляющих – элементах официального сайта. Модерность – это привлекательность и соответствие современным трендам в области инноваций, а также инновационность. Полезность соответственно понимается как степень удовлетворения тех или иных потребностей посетителя сайта.

Матрица строится на осях, где горизонтальная шкала показывает модерность различных аспектов в баллах, а вертикальная шкала демонстрирует полезность ресурса по результатам экспертной оценки.

Анализируются все структурные элементы веб-сайта, в том числе главная страница, раздел «О компании», контактные данные, достижения, новости, номенклатура продукции и др.

В рамках предложенной матрицы каждый из четырех квадрантов представляет собой уникальное сочетание уровней модерности и полезности.

К «прогрессивному маркетинга» относятся те составляющие, которые не только актуальны и инновационны, но и значительно облегчают пользователю выполнение его задач.

А вот к «оптимальному маркетингу» относятся современные, однако недостаточно функциональные элементы, внешне привлекательные, но не обеспечивающие должного уровня полезности.

В «Безосновательном маркетинге» расположены устаревшие ресурсы, хотя и достаточно полезные для посетителя сайта.

«Ограниченный маркетинг» сочетает как морально устаревшие, так и мало полезные ресурсы.

Анализ проводится экспертным методом с учетом важности каждого элемента.

Предлагаемая методика апробирована на предприятиях промышленности строительных материалов [3]. Модерность сайта ОАО «Гомельстройматериалы» составила 6,87, полезность – 8,15. Модерность сайта ОАО «Забудова» составила 7,18, полезность – 8,1. Модерность сайта ОАО Красносельскстройматериалы» составила 6,51, полезность – 6,98.

Структурные элементы сайта ОАО «Гомельстройматериалы» оцениваются как более полезные, чем современные, с разницей более чем в один балл. Это может негативно сказаться на восприятии ресурса пользователями, которые, в первую очередь, обращают внимание на визуальную привлекательность и простоту информации.

На сайте ОАО «Забудова» полезность структурных элементов также превышает их современность, что может отпугнуть посетителей. Для улучшения ситуации организации следует обратить внимание на повышение уровня модерности, так как пользователи сначала оценивают внешний вид и структуру сайта.

ОАО «Красносельскстройматериалы» демонстрирует более сбалансированное соотношение полезности и современности структурных элементов. Однако разрыв между этими показателями не так велик, как у других предприятий. Для повышения привлекательности сайта организации стоит сосредоточиться на улучшении таких элементов, как информация о достижениях, акциях и магазинах.

Распределение предприятий по квадрантам матрицы «Модерность – полезность» представлено на рис. 2.

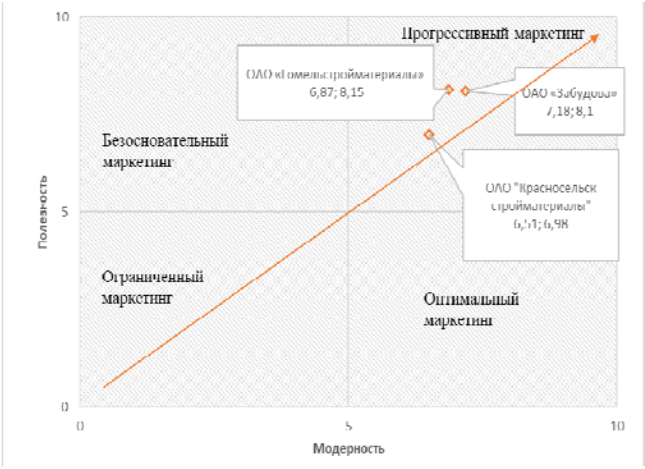


Рис. 2. Матрица «Модерность – полезность» (МП)

Все исследуемые предприятия находятся в зоне прогрессивного маркетинга, что свидетельствует об их высокой модерности и полезности. Структурные элементы сайтов этих предприятий соответствуют современным требованиям, а их использование приносит пользователям удовлетворение и облегчает выполнение задач. Близость точек к медиане указывает на необходимость дальнейшего совершенствования полезности элементов. Положительная динамика посещений и просмотров подтверждает эффективность применения данной методики.

Матрица «Модерность – полезность» используется для анализа и оптимизации интернет-маркетинговых стратегий, помогая компаниям эффективно использовать цифровые каналы для достижения бизнес-целей. После построения матрицы следует выбрать соответствующие стратегии для дальнейшего развития.

Для предприятий, находящихся в квадранте «Безосновательный маркетинг», рекомендуется стратегия инновационного прорыва, направленная на исследование рынка и внедрение новейших технологий взаимодействия с потребителями.

Если предприятие находится в квадранте «Ограниченный маркетинг», целесообразно применить стратегию «Ренессанс взаимодействия». Эта стратегия направлена на восстановление и улучшение взаимодействия с клиентами, а также на исследование рынка и предпочтений потребителей.

Для предприятий в квадранте «Прогрессивный маркетинг» рекомендуется стратегия устойчивого роста, которая заключается в поддержании текущей позиции на рынке. Основные направления включают активное взаимодействие с потребителями и посредниками.

Предприятиям, находящимся в квадранте «Оптимальный маркетинг», подходит стратегия «интерактивный синергетик». Она фокусируется на создании высокоэффективного интерактивного взаимодействия и требует проведения глубинных маркетинговых исследований.

Таким образом, в рамках настоящего исследования рассмотрен процесс формирования доверия в B2B-секторе с учетом цифрового взаимодействия. «Матрица цифровой верификации» помогает классифицировать инструменты промышленного интернет-маркетинга по направлениям функциональной полезности и визуальной привлекательности. Предложенная матрица и система критериев обеспечивают воспроизводимый аудит цифровых каналов и обоснование инвестиций в инструменты верификации.

Авторская методика матричного типа матрица «Модерность – полезность» (МП) может быть использована для анализа эффективности применения инструментов интернет-маркетинга.

Проведенный анализ информационных ресурсов предприятия позволяет выявить четыре стратегически перспективных направления, требующие детального рассмотрения и разработки соответствующих тактических мер: инновационного прорыва, устойчивого роста, ренессанса взаимодействия, интерактивного синергетика.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для выработки стратегии развития интернет-маркетинга на данных и аналогичных предприятиях.

Литература

1. Карчевская, Е. Н. Матричный анализ модерности и полезности информационных ресурсов предприятия / Е. Н. Карчевская, В. А. Сидоркина, Ю. А. Галова // Экономика. Бизнес. Финансы. – 2024. – № 9. – С. 21–24.
2. Карчевская, Е. Н. Методические аспекты матричного анализа информационных ресурсов предприятия / Е. Н. Карчевская, В. А. Сидоркина, Ю. А. Галова // Потребительская кооперация. – 2024. – № 4. – С. 52–57.
3. ОАО «Гомельстройматериалы». – URL: https://oaogsm.by/ (дата обращения: 02.04.2026).
4. 2024 Buyer Experience Report // 6sense. – URL: https://6sense.com/science-of-b2b/2024-buyer-experience-report/ (date of access: 02.04.2026).
5. Buyer Intent Data: Strategic Currency Redefining B2B Sales (цит. по Denave) // LinkedIn. – URL: https://ru.linkedin.com/pulse/buyer-intent-data-strategic-currency-redefining-b2b-sales-denave-an6tc (date of access: 02.04.2026).
6. B2B Buying Mayhem (Podcast Episode) // Forrester. – URL: https://www.forrester.com/what-it-means/ep431-b2b-buying-networks/ (date of access: 02.04.2026).

НОВЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАСТУТ ИЗ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВА

Н. В. Грунтович

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

Посвящена представленная работа обзору проводимых исследований в области диагностирования текущего состояния и прогнозирования показателей энергетической эффективности промышленных комплексов. Качественные и количественные изменения в составе и сложности технологического оборудования требуют создания новых методов для выявления и оценки экономии топливно-энергетических ресурсов от мероприятий в технологических процессах промышленных предприятий, прогнозирования и нормирования общих и удельных расходов электрической энергии, природного газа.

Ключевые слова: энергоэффективность, промышленные предприятия, прогнозирование, система энергоснабжения, системный анализ, контроль энергоэффективности, энергетическая составляющая в себестоимости продукции, модели потребления ТЭР от влияющих факторов.

В 90-х гг. после развала СССР молодая Республика Беларусь (РБ) столкнулась с проблемой низкой обеспеченности собственными энергоресурсами. Статья заместителя председателя Комитета по энергосбережению и энергонадзору при Кабинете Министров Александра Савановича «Ежегодно 20 заводов-гигантов работают вхолостую» в центральной газете РБ от 13 сентября 1994 г. поставила задачу активно начать заниматься энергосбережением и повышением энергетической эффективности (ЭЭФ). В статье отмечалось: «Из потребляемых в прошлом году (1993) 32,5 млн т у. т. неэффективно израсходовано 8 млн т у. т. Это 400 млн долл. по льготной цене 50 долл.

за тонну, что эквивалентно годовому потреблению энергоресурсов на 20 заводах как МТЗ и в 4 раза больше ежегодной добычи нефти в Беларуси». Государство приняло контроль за эффективным использованием ТЭР, 85 % из которых Беларусь покупала за рубежом. В 1998 г. был принят Закон «Об энергосбережении» [1].

Государственный контроль в области эффективности расходования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) фактически обусловлен тремя причинами:

1) низкой обеспеченностью РБ собственными энергоресурсами;

2) неизбежным ростом стоимости энергоресурсов;

3) существенно высокой долей стоимости энергоресурсов в себестоимости продукции.

Необходимость поиска *новых подходов для оценки ЭЭФ определяется коренными изменениями условий функционирования промышленными предприятиями* (ПП):

– нестабильность производственной программы;

– увеличение энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции, что отразилось на ее конкурентной способности;

– сложность объектов управления.

Анализ структуры затрат на производство промышленной продукции по данным статистической отчетности СССР 1987 г. [2] показал, что с 1965 по 1987 г. доля электрической энергии (ЭЭ) в структуре затрат на производство продукции по стране составляла от 2,1 до 2,8 % за разные годы. В 1987 г. в химической и нефтехимической промышленности доля ЭЭ в структуре затрат на производство составляла 8,9 %, в машиностроительном комплексе – 2 %, в легкой промышленности – 0,7 %. Ранжирование энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции показало (рис. 1), что наиболее энергоемкими отраслями после электроэнергетики и ТЭК являются следующие отрасли: строительные материалы – 12,7 %; металлургический комплекс – 12,3 %; химическая и нефтехимическая отрасль – 10,6 %; химико-лесной комплекс – 8,9 %; тяжелая промышленность – 8,8 %.

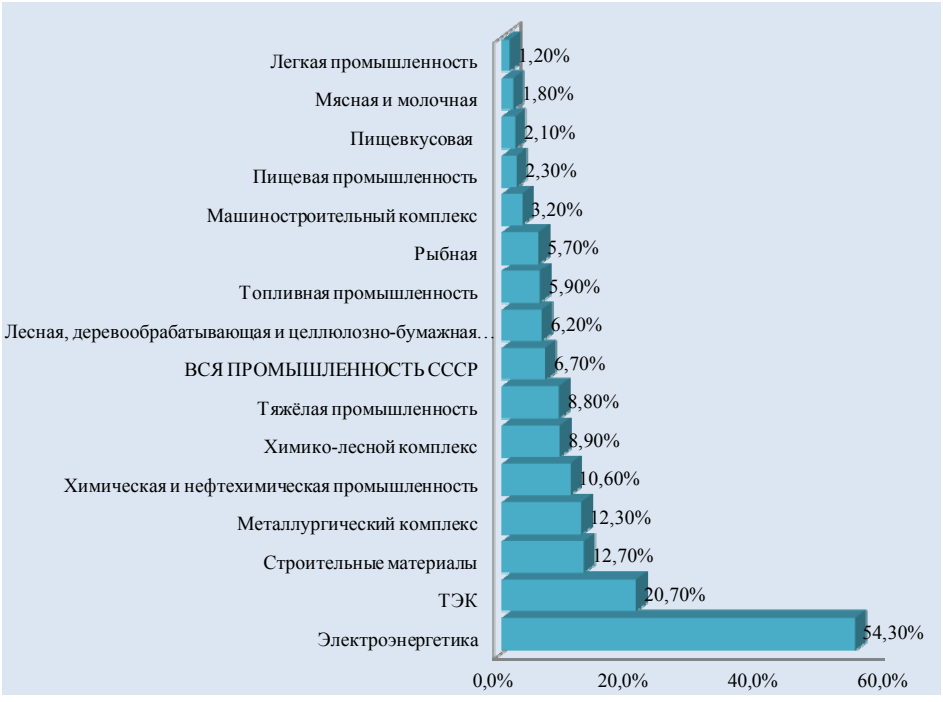


Рис. 1. Ранжирование энергетической составляющей затрат
в себестоимости продукции по отраслям промышленности СССР (1987 г.)

Но уже за период с 1992 по 1996 г. энергетическая составляющая затрат в себестоимости продукции увеличилась в России – стране, обеспечивающей полностью себя ТЭР: в машиностроении – в 1,83 раза; легкой промышленности – в 3,44 раза; химической и нефтехимической промышленности – в 2,82 раза. Аналогичные проблемы появились и на предприятиях Беларуси. Приведем такой пример. У самого современного и молодого производства по выпуску беленой целлюлозы для предприятия по выпуску беленой целлюлозы суммарная доля денежных затрат на энергопотребление в общих объемах затрат производственной деятельности за 2020 г. в процентном соотношении составила 15,3 %. Из них: топливо – 6,4 %; электроэнергия – 5,2 %; тепловая энергия – 3,8 %.

Проблема снижения энергетической составляющей затрат и повышения конкурентоспособности предприятий на внешних рынках – одна из актуальнейших задач экономической безопасности государства. А тогда, в 1994 г., к нам стали обращаться энергетики промышленных предприятий: почему в условиях снижения объемов выпуска продукции удельные расходы ТЭР, на выпуск продукции возрастали в несколько раз? Ученые кафедры, которые уже активно помогали предприятиям решать вопросы нормирования расхода ТЭР, знали ответ на этот вопрос. И 24 февраля 1995 г. в газете «Гомельская правда» вышла статья-интервью «Куда прячем расточительность», где были изложены ответы на многие вопросы производственников.

Еще в 1947 г. было показано для ПП, что в наиболее общем виде энергетическая характеристика может быть представлена уравнением [3]:

$$W = w_{\text{уд}}\Pi + W_{\text{усл.-пост}},\ \text{тыс. кВт} \cdot \text{ч}, \qquad (1)$$

где W – расход ЭЭ за данный отрезок времени, зависящий от вида цеха, пролета и т. д.; $w_{\text{уд}}$ – переменная часть расхода ЭЭ на единицу продукции, в основном зависящая от нагрузки, тыс. кВт · ч; П – размер продукции за соответствующее время, единица измерения продукции; $W_{\text{усл.-пост}}$ – постоянная часть расхода ЭЭ, в основном, не зависящая от нагрузки, тыс. кВт · ч.

Из уравнения (1) удельный расход ЭЭ от объема выпуска продукции может быть определен как:

$$W_{\text{уд}} = w_{\text{уд.техн}} + W_{\text{удсд.-пост}} / \Pi,\ \text{кВт} \cdot \text{ч/единица продукции}. \qquad (2)$$

Зависимость (2) имеет гиперболический вид и представлена на рис. 2.

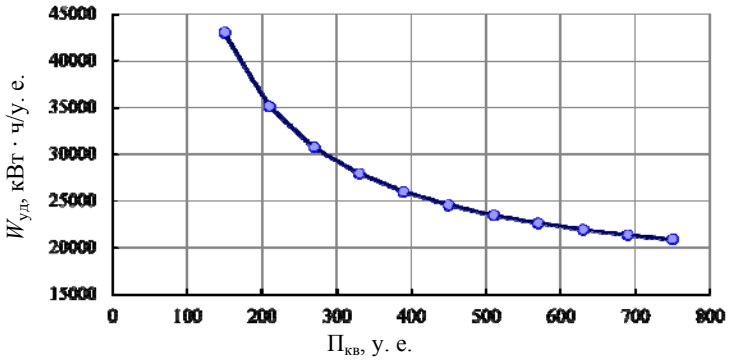


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электрической энергии от квартального объема выпуска продукции

Из зависимости (рис. 2) видно, что при повышении загрузки производства (наращивании объемов выпуска продукции) происходит снижение удельных расходов ТЭР на единицу выпускаемой продукции, а при снижении объемов выпуска продукции отмечается рост удельных расходов, т. е. снижение ЭЭФ производства. И причиной снижения ЭЭФ является условно-постоянная расхода ТЭР. Неслучайно на первых семинарах, которые проводили в нашей стране специалисты из Германии, Англии и других европейских государств, делался акцент на разработку моделей общего и удельного расхода энергоресурса от объемов выпуска продукции [4]. Однако, как строить модели, как по ним оценивать текущее состояние и прогнозировать ЭЭФ на перспективу, иностранные гости не рассказывали. Способы построения моделей и методы оценки текущего состояния показателей ЭЭФ разрабатывались на кафедре научной группой доктора технических наук, профессора Н. В. Грунтович *Были определены задачи*, *решаемые с использованием модели потребления ТЭР в зависимости от объема выпуска продукции*:

– анализ энергоэффективности существующих режимов производства;

– расчет плановой потребности ТЭР в условиях изменяющейся производственной программы;

– оценка потенциала повышения ЭЭФ за счет роста загрузки технологического оборудования и наращивания объемов выпуска продукции;

– оценка эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий;

– расчет ЦП в сопоставимых условиях.

Таким образом, модели, представляющие собой зависимость расхода ТЭР или удельного расхода энергоресурса от объема выпуска продукции и других влияющих факторов, *являются анализатором системы управления* (*энергоменеджмента*) *современного промышленного предприятия.*

Известны интересные работы научной школы по энергетической эффективности с 2000-х гг. Проведенные на высоком научном уровне энергетические обследования, разработанные методики как по нормированию расхода ТЭР, так и по оценке показателей энергетической эффективности, позволили промышленным предприятиям различных отраслей промышленности решать текущие задачи:

– в 2009 г. – Денис Равильевич Мороз подготовил диссертационную работу «Моделирование энергопотребления промышленных потребителей для прогнозирования показателей энергетической эффективности» на базе Светлогорского ПО «Химволокно» [5];

– в 2010 г. – на базе двух предприятий транспорта нефти «Дружба» была защищена диссертационная работа Александра Станиславовича Фикова [6];

– с 2014 по 2016 г. – Алексеем Александровичем Капанским проведена огромная научно-исследовательская работа для трех водоканалов Республики Беларусь. В 2019 г. – тема кандидатской диссертации: «Прогнозирование и оценка текущего состояния энергетической эффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения» [7];

– в 2021 г. – Евгений Леонидович Шенец защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Оценка и прогнозирование показателей энергоэффективности промышленных потребителей на основе статистических моделей потребления ТЭР от объема выпуска продукции» [8].

Научная группа выполняла и задания Государственных программ научного исследования (ГПНИ):

– 2014–2015 гг. – выполнялось задание 2.2.36 «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процес-

сов для снижения энергоемкости продукции» (№ ГР 20141922 от 20.08.2014 г.) ГПНИ на 2014–2015 гг. «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика», подпрограмма «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции»;

– 2021–2025 гг. – задание 1.1.11 «Методика оценки энергоэффективности промышленных производств с газовым печным оборудованием для обеспечения устойчивого функционирования и развития энергетического комплекса Республики Беларусь» подпрограммы 1.1 «Энергетическая безопасность Республики Беларусь на основе принципов устойчивого развития» ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2025 гг. (№ ГР 20211650 от 26.05.2021 г.);

– 2026–2030 гг. – задание 1.11 «Разработка методологических принципов управления электропотреблением основных технологических процессов для снижения энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции» подпрограммы 1.1 «Устойчивое энергетическое развитие» ГПНИ «Энергетические системы и технологии» («Энергофизика–2030») на 2026–2030 гг.

Обобщая сказанное, хочется добавить, что, решая задачи производственников на высоком научном уровне, ученые развиваются сами, развивают науку и делятся современными знаниями со студентами. Очень важно помнить одну великую истину: *теория без практики мертва или бесплодна*, *практика без теории невозможна или пагубна.*

Литература

1. Об энергосбережении : Закон Респ. Беларусь от 8 янв. 2015 г. № 289-З // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 30.05.2026).
2. Промышленность СССР : стат. сб. / Госкомстат СССР ; сост. В. И. Толкушин. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 286 с.
3. Кудрин, Б. И. Электроснабжение, оперативное и планируемое нормирование расхода электроэнергии, энергосбережение / Б. И. Кудрин // Электрика. – 2007. – № 4. – С. 3–6.
4. Материалы семинара «Энергетический менеджмент – новое направление системного менеджмента. Требования ISO 50001 и практика их реализации», Минск, 26–27 нояб. 2014 г. // Австр. энергет. агентство.
5. Моделирование энергопотребления промышленных потребителей для прогнозирования показателей энергетической эффективности : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.14.01 / Мороз Денис Равильевич, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2009. – 21 с.
6. Прогнозирование изменения электропотребления систем транспорта нефти на основе моделирования общих и удельных расходов электрической энергии : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.14.01 / Фиков Александр Станиславович, Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2010. – 22 с.
7. Прогнозирование и повышение энергетической эффективности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.14.01 / Капанский Алексей Александрович : [работа выполн. в Гомел. гос. техн. ун-те им. П. О. Сухого] ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2019. – 28 с.
8. Оценка и прогнозирование показателей энергоэффективности промышленных потребителей на основе статистических моделей потребления ТЭР : автореферат дис. … канд. техн. наук : 05.14.01 Энергетические системы и комплексы / Шенец Евгений Леонидович, Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2021. – 29 с.

СЕКЦИЯ I
МАШИНОСТРОЕНИЕ И НЕФТЕГАЗОРАЗРАБОТКА

К ВОПРОСУ О ПЕРЕТОЧКЕ РЕЗЦОВ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

А. А. Алексеев

Передовая инженерная школа в станкостроении Союзного государства, г. Псков, Российская Федерация

Научный руководитель С. И. Дмитриев

Использование фасонных резцов на токарных станках с ЧПУ в ряде случаев позволяет значительно повысить производительность и упростить обработку деталей. Задача продления срока службы фасонных резцов для станков с ЧПУ требует глубокой проработки конструкции резца и учета возможности переточки уже на стадии проектирования инструмента.

Ключевые слова: фасонные резцы, обработка поверхностей сложного профиля, увеличение срока службы режущего инструмента, обработка на станках с ЧПУ, заточка фасонных резцов.

Увеличение срока службы резцов для станков с ЧПУ представляет собой сложную и актуальную задачу. Особенно важно решение этой задачи для фасонных и профильных резцов для токарных станков с ЧПУ, так как изготовление подобных резцов на предприятии – долгий и трудозатратный процесс, а приобретаемые стандартизованные резцы имеют высокую стоимость.

Сторонние производители резцов для станков с ЧПУ постоянно совершенствуют конструкцию державок и сменных пластин с целью повышения их стойкости, потому как переточка таких пластин, как правило, невозможна. К способам повышения стойкости резца относится как использование новых, более стойких материалов режущих пластин, так и нанесение на них покрытий.

При изготовлении резцов силами предприятия используются, как правило, наиболее доступные режущие пластины из широко распространенных материалов, и отсутствует возможность нанесения на них покрытий. Кроме экономических соображений и требования к постоянной доступности на рынке инструмента, обеспечивающего проектируемый технологический процесс, важную роль играют компетенции сотрудников в работе с материалами и существующее на предприятии оборудование. В этом случае единственным способом продления срока службы фасонного резца для токарных станков с ЧПУ представляется переточка режущей пластины.

Переточка режущей пластины в общем случае подразумевает обработку всех контактирующих с материалом заготовки или стружкой поверхностей резца, а не только заточку по передней поверхности. Это связано с возможностью возникновения на контактирующих с материалом поверхностях и кромках различных дефектов, в особенности – сколов и раковин [1]. Подобная переточка резца или сменной вставки резца нарушает размеры и геометрию режущей пластины, изменяя размер профиля в сторону уменьшения, и изменяет положение режущей кромки пластины относительно оси центров станка.

В связи с указанным выше для сохранения размеров и углов режущей пластины резца или сменной вставки перед переточкой необходимо изменить положение режущей пластины относительно установочных баз резца так, чтобы после переточки режущая пластина сохраняла заданные изначально геометрию и положение относительно оси центров станка. В случае использования резцов со сменными вставками очевидным решением представляется поворот сменной вставки относительно оси державки против часовой стрелки на величину снимаемого при заточке припуска.

В качестве примера рассмотрим переточку сменной вставки резца для токарных станков с ЧПУ (рис. 1), описанных в литературе [2]. Конструктивной формой резец представляет собой компиляцию стержневого и круглого фасонного резца [3]:

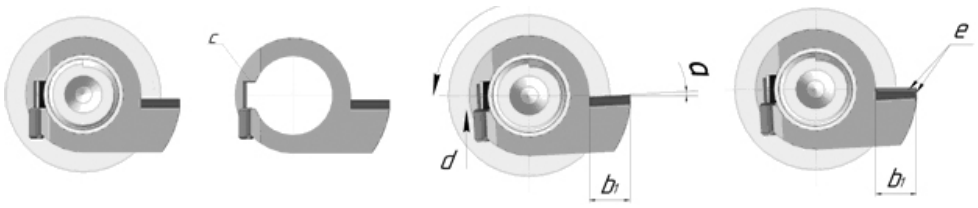
а) *б*)

Рис. 1. Общий вид фасонного резца для станков с ЧПУ (*а*);
общий вид вставки фасонного резца с местным разрезом (*б*)

Резец (рис. 1, *а*) представляет из себя державку *1*, на которую установлена кольцевая сменная вставка *2*, прижимная промежуточная вставка *3* и гайка *4*. Сменная вставка устанавливается на цилиндрическую установочную поверхность державки, ориентируется с помощью шпоночного паза и закрепляется с помощью силы трения, создаваемой прижимом торца вставки к торцу оправки с помощью гайки.

Кольцевая сменная вставка (рис. 1, *б*) имеет резьбовое отверстие, выходящее в шпоночный паз вставки, в которое установлен винт *5*. Винт выполняет задачу выбора зазора в шпоночном соединении резца.

Подготовка сменной вставки к заточке (рис. 2) начинается с обработки шпоночного паза – шпоночный паз расширяют так, чтобы при ориентировании сменной вставки режущая кромка оказалась выше линии центров станка на размер снимаемого при заточке припуска. Образовавшийся в результате доработки паза зазор выбирают винтом. Дальнейшая переточка вставки производится обработкой всех поверхностей и углов режущей пластины так, как при заточке вновь изготовленной вставки.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 2. Порядок работ при переточке изношенной сменной вставки:
а – установленная на державку вставка резца до переточки; *б* – обработка шпоночного паза по поверхности с; *в* – выборка зазора в шпоночном пазе винтом *d* с поворотом вставки на угол *а* и изменение вылета режущей пластины до размера $b1$; *г* – обработка поверхностей *е* при переточке резца

В результате заточки неизбежно уменьшается величина вылета режущей пластины и соответственно – наибольший обрабатываемый резцом размер по глубине. Это надо учитывать при проектировании сменной вставки и закладывать запас по размеру вылета режущей пластины в конструкцию. Например, описанный в литературе [2] резец выдерживает до трех переточек, каждая из которых уменьшает вылет на 0,2 мм.

Фасонные резцы со сменными вставками для станков с ЧПУ могут быть выполнены как компиляция известных типов стержневых и круглых фасонных резцов с использованием схожих методов заточки. Конструкция таких резцов должна обеспечивать настройку переднего угла резца для возможности его переточки после износа.

Резцы схожей конструкции изготовлены и успешно используются для обработки нестандартных резьб на предприятии АО «Автоспецоборудование» г. Пскова.

Литература

1. Лоладзе, Т. Н Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – С 69–83.
2. К вопросу о применении фасонных и профильных резцов со сменными вставками из твердого сплава на токарных станках с ЧПУ / А. А. Алексеев, С. И. Дмитриев, А. И. Самаркин, Е. А. Евгеньева // Металлообработка. – 2024. – № 6 (144). – С. 3–10.
3. Нарожных, А. Т. Проектирование фасонных резцов / А. Т. Нарожных, Г. Г. Скребнев, В. В. Токарев. – Волгоград : РПК «Политехник» Волгогр. гос. техн. ун-та, 1999. – С. 6.

РАЗРАБОТКА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ Амкодор 9531 В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ Fluidsim

И. А. Скируха

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

Научный руководитель Е. В. Хазеев

Снегоочиститель позволяет эффективно и быстро очистить городские дороги, шоссе и другие виды дорожного покрытия от снега. Рассмотрены гидравлическая система навесного снегоочистителя и разработка электрического управления приводом снегоочистителя Амкодор 9531.

Целью настоящей работы является разработка гидравлической системы снегоочистителя Амкодор 9531 в программном комплексе FluidSim.

Рассмотрим следующие основные характеристики:

1. *Назначение и состав снегоочистителя*. Снегоочиститель шнекороторный Амкодор 9531 (рис. 1) предназначен для очистки от снега шоссейных дорог, взлетно-посадочных полос, рулежных дорожек, мест стоянок самолетов, а также может использоваться для удаления снежных валов, образованных другими снегоочистителями [1].

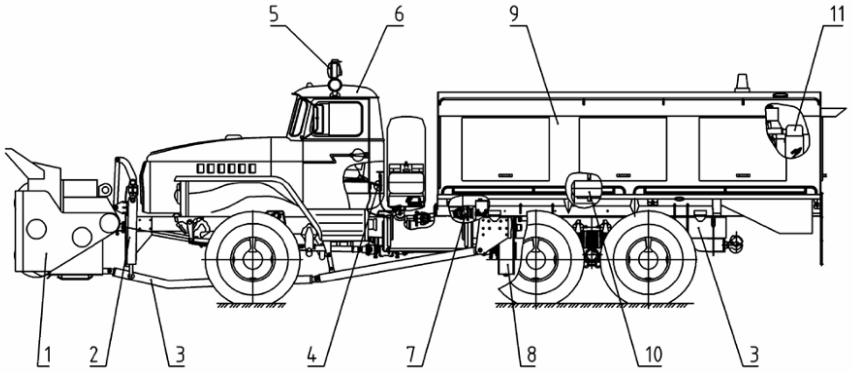


Рис. 1. Общий вид снегоочистителя:
1 – рабочий орган; *2* – гидросистема; *3* – система навески;
4 – управление; *5* – электрооборудование; *6* – шасси;
7 – установка ходоуменьшителя; *8* – привод рабочего органа;
9 – облицовка; *10* – пневмосистема; *11* – установка силовая

Технические данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические данные

Наименование показателя	**Значение**			
	Амкодор 9531	**Амкодор 9531-01**	**Амкодор 9531-02**	**Амкодор 9531-03**
Тип снегоочистителя	Шнекороторный			
Тип и марка шасси	УРАЛ-4320			
Дальность отбрасывания основной массы снега, м	30			
Максимальная дальность отброса отдельных кусков снега, м	50			
Максимальная толщина снега, очищаемая за один проход, м	1,6			
Ширина полосы, очищаемая за один проход, м	2,81			
Максимальная мощность двигателя привода рабочего органа, кВт	295 – при 1600 мин$^{-1}$	295 – при 1600 мин$^{-1}$	302 – при 1600 мин$^{-1}$	220 – при 1900 мин$^{-1}$
Управление РО	Гидравлическое			
Удельная энергоемкость, кВт/т м/ч, не более	0,008			
Удельный расход топлива, л/ч/т м/ч, не более	0,0025			

2. *Гидравлическая система снегоочистителя*. Гидросистема предназначена для подъема, опускания рабочего органа и поворота кожуха ротора. Состоит из шестеренного насоса, гидропанели с распределителями *4* и предохранительным клапаном *3*, цилиндра поворота кожуха ротора *6*, масляного бака *1*, линейного фильтра *8*, цилиндров подъема рабочего органа *5*. Схема принципиальная показана на рис. 2.

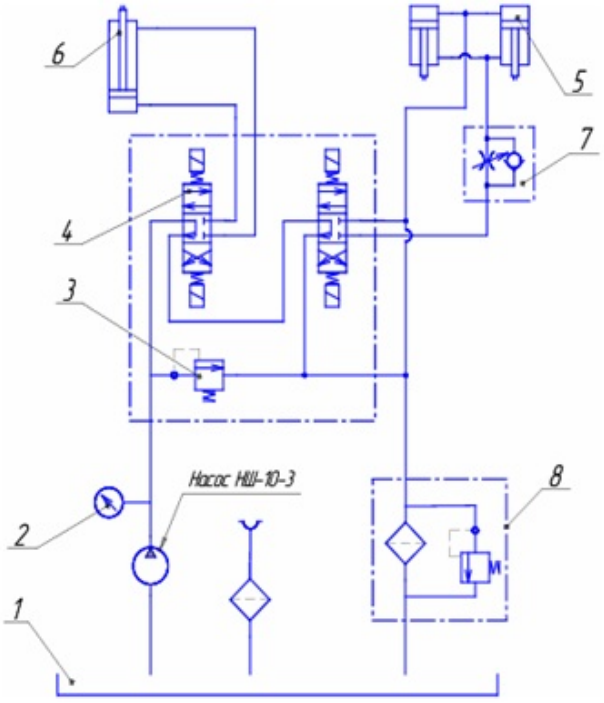


Рис. 2. Схема гидравлическая принципиальная:
1– бак Д – 902.01.53.000; *2* – манометр МА 250М;
3 – клапан предохранительный КПМ 6/3-В3 ТУ 2–053–1441-49;
4 – гидрораспределитель ВЕ 6.64.Г24Н ХЛ1 ГОСТ 24679-81;
5 – гидроцилиндры подъема рабочего органа Д–902.01.30.000;
6– гидроцилиндр поворота кожуха ротора Д–902.01.20.000;
7 – дроссель с обратным клапаном ДК8/3TG; *8* – фильтр линейный
1.1. 25-25–И ОСТ 22-883-75/ТУ22-4974

3. Гидравлическая схема работы рабочих органов снегоочистителя 9531 представлена на рис. 3.

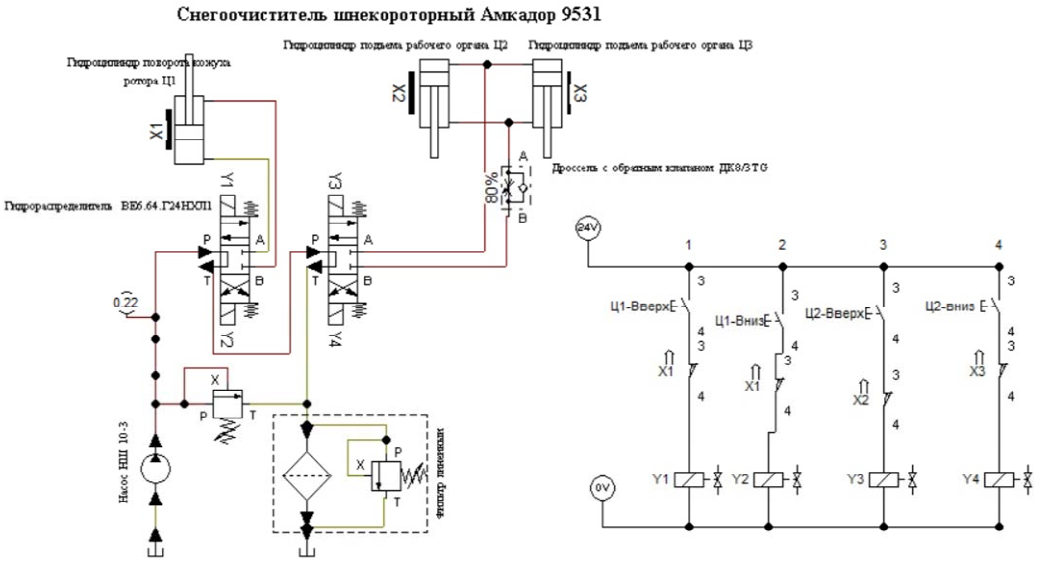


Рис. 3. Схема управления гидросистемой снегоочистителя 9531

Графики полученных результатов даны на рис. 4.

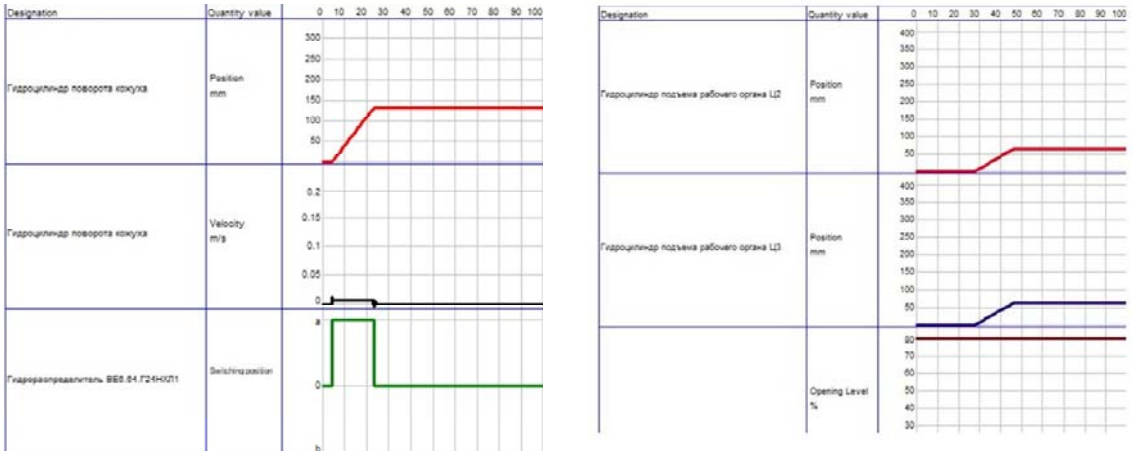


Рис. 4. Графики полученных результатов

В ходе выполнения работы была разработана гидравлическая система снегоочистителя Амкодор 9531 в программном комплексе *FluidSim*, благодаря чему данную разработанную гидросистему можно применять при прикладном моделировании данной мобильной машины.

Литература

1. Боровиков, А. В. Исследование работы гидропривода с помощью программы *Fluidsim* / А. В. Боровиков // Междунар. студен. науч. вестн. – 2019. – № 5-1.
2. Снегоочиститель шнекороторный Амкодор 9531 : рук. по эксплуатации 9531.00.00.000 РЭ. – Минск : ОАО «Амкодор». – 2011. – 70 с.
3. Хазеев, Е. В. Анализ имитационного моделирования гидравлических систем мобильных машин в различных программных комплексах / Е. В. Хазеев, Ю. А. Андреевец, К. В. Пупенко // Машиностроение: инновационные аспекты развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 2022 г. / НИЦ МС. – СПб., 2022 – № 5 – С. 18–22.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т. Д. Стасенко

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Метод гидроабразивной резки является одним из перспективных для разделения большинства материалов в промышленном производстве. Основные преимущества гидроабразивной резки по сравнению с традиционными методами обработки резанием заключаются в том, что обработка происходит без нагрева заготовки, струей воды с абразивом малого диаметра, поэтому кромки обрабатываемого материала не подвергаются термической нагрузке, не образуются окислы и окалины, а высокое качество получаемых кромок не требует дополнительной механической обработки. Рассмотрена производительность метода гидроабразивной резки различных материалов, которая зависит от изменения таких параметров, как скорость подачи заготовки, давления воды, свойств материала заготовки

и ее толщины, подачи воды, расхода абразива, диаметра выходного сопла. Показано, что повышение производительности прямо пропорционально повышению рабочего давления, а вид обрабатываемого материала практически не влияет на производительность гидроабразивной резки. Установлено, что свойства обрабатываемого материала определяют затраты энергии на гидроабразивную резку, а давление и расход воды, подаваемой в сопло, не оказывают существенное влияние на энергоэффективность.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, производительность, водяная струя, погрешность обработки, режущая головка, давление, расход.

Метод гидроабразивной резки является одним из перспективных для разделения большинства материалов в промышленном производстве. Гидроабразивная резка позволяет обрабатывать практически все материалы (металлы и их сплавы, стекло, графит, мрамор, гранит, пластик, композитные материалы и т. п.). Физическая суть метода гидроабразивной резки состоит в отрыве и уносе из полости реза частиц материала скоростным потоком твердофазных частиц, образованным водяной струей высокого давления с примесью абразива. Благодаря энергии, которой обладает такая струя, появляется возможность резать материалы большой толщины. Разрушающая сила водяной струи гасится водой, находящейся в ванной, на поверхности которой располагается обрабатываемая заготовка (рис. 1). Основные преимущества гидроабразивной резки по сравнению с традиционными методами обработки резанием заключаются в том, что обработка происходит без нагрева заготовки, струей воды с абразивом малого диаметра, поэтому кромки обрабатываемого материала не подвергаются термической нагрузке, не образуются окислы и окалины, а высокое качество получаемых кромок не требует дополнительной механической обработки. Это позволяет обеспечить бесконечную стойкость инструмента, высокую скорость резания любых материалов, обрабатывать материалы со сложной волнистой криволинейной поверхностью и сложных контуров, уменьшить общую трудоемкость обработки детали. Небольшая ширина реза позволяет снизить количество отходов заготовки, повысить рентабельность использования в производстве [3].

Несмотря на все вышеперечисленные преимущества, гидроабразивная резка имеет некоторые недостатки, такие как возникновение погрешности обработки при движении по радиусу, конусность кромок при обработке заготовок большой толщины. [2] Погрешности обработки при движении по радиусу связаны с тем, что в качестве режущего инструмента используется гидроабразивная струя. Эта струя при высоких скоростях подачи заготовки на выходе из материала отстает от точки входа. При резке внутренних углов отставание струи также может влиять на правильность обработки, потому как инерционность струи может вызвать отклонение размеров заготовки от заданных. При изменении направления резки струя может сделать зарез в заготовке. Конусность кромок, получаемых поверхностей, зависит от ряда параметров: расстояния от режущей головки до обрабатываемой заготовки, свойств обрабатываемого материала, скорости подачи, типа используемого абразива.

Первые недостатки можно устранить за счет уменьшения скорости подачи в местах с криволинейной формой. Проблема возникновения конусности обрабатываемых кромок решается минимизацией зазора между режущей головкой и заготовкой при снижении скорости подачи. Однако снижение скорости подачи приводит к уменьшению производительности.

Целью работы является определение производительности гидроабразивной обработки различных материалов.

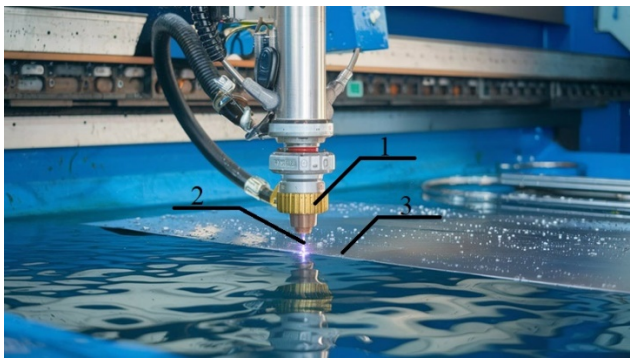


Рис. 1. Резка водяной струей:
1 – режущая головка; *2* – водяная струя;
3 – обрабатываемая заготовка

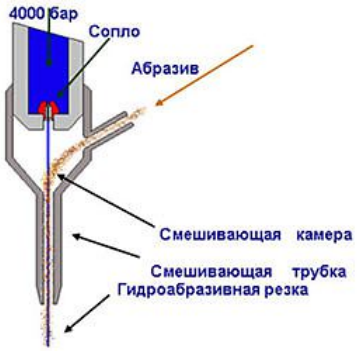


Рис. 2. Режущая головка гидроабразивной установки

Гидроабразивная обработка на промышленных предприятиях выполняется на гидрообразных станках при обработке заготовок толщиной до 300 мм. При оснащении системами ЧПУ значительно повышается производительность труда и расширяются возможности применения и сложность выполняемых операций. Примерами таких станков могут служить Flow WMC2 с ЧПУ (США), OMAX JetMaching Center 2626 с ЧПУ (США), BarsJet 1510-3.1.1 (Россия) [1].

Производительность гидроабразивной резки зависит от изменения следующих параметров: скорости подачи заготовки, м/мин; давления жидкости, МПа; вида материала и его толщины, мм; расхода воды л/мин; расхода абразива, кг/мин; диаметра выходного сопла, мм.

Исследования проводились при заданных начальных параметрах: диаметр сопла – 0,762 мм; толщина обрабатываемого материала –12,5 мм. Производительность обработки определялась при следующих условиях: давление – 276 МПа; расход воды – 1,91 л/мин; расход абразива – 0,27 кг/мин и давление – 414 МПа; расход воды – 2,27 л/мин; расход абразива – 0,4 кг/мин. В качестве обрабатываемых заготовок были выбраны пластины из следующих материалов: 12Х18Н9, Сталь 40, 6Al4V.

Результаты определения производительности гидроабразивной обработки представлены на рис. 3, из которого видно, что вид обрабатываемого материала практически не влияет на производительность гидроабразивной резки, а существенное влияние оказывает давление и расход воды, подаваемой в сопло. Изменение производительности составляет от 38 до 49 мм^3/с при обработке с давлением 414 МПа и от 19 до 25 мм^3/с – при обработке с давлением 276 МПа, т. е. повышение производительности прямо пропорционально повышению рабочего давления.

Анализ энергоэффективности гидроабразивной резки выполнялся путем определения гидравлической мощности и затрат энергии на единицу объема обрабатываемого материала (рис. 4). Гидравлическая мощность N определяется по зависимости:

$$N = PQ,$$

где P – давление; Q – расход воды.

Затраты энергии E на единицу объема обрабатываемого материала рассчитываются по формуле

$$E = \frac{N}{\Pi},$$

где П – производительность.

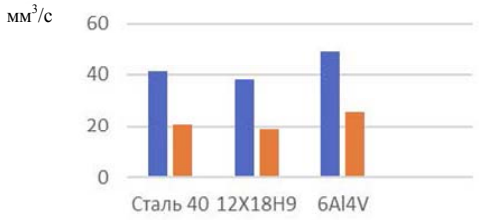


Рис. 3. Производительность гидроабразивной обработки:
■ – давление – 414 МПа; расход воды – 2,27 л/мин; расход абразива – 0,4 кг/мин;
■ – давление – 276 МПа; расход воды – 1,91 л/мин; расход абразива – 0,27 кг/мин

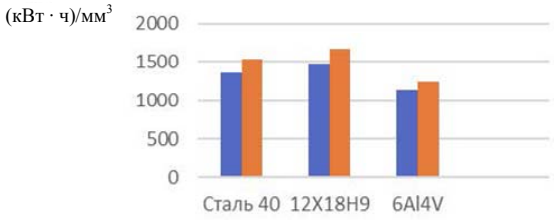


Рис. 4. Затраты энергии на единицу объема обрабатываемого материала:
■ – давление – 414 МПа; расход воды – 2,27 л/мин; расход абразива – 0,4 кг/мин;
■ – давление – 276 МПа; расход воды – 1,91 л/мин; расход абразива – 0,27 кг/мин

Из рис. 4 видно, что свойства обрабатываемого материала определяют затраты энергии на гидроабразивную резку. Изменение затрат энергии составляет от 1145 кВт · ч/мм^3 – при обработке титанового сплава марки 6Al4V с давлением 414 МПа; до 1479 кВт · ч/мм^3 – при обработке нержавеющей стали марки 12Х18Н9 при том же давлении. При этом видно, что давление в 414 МПа обеспечивает меньшие затраты энергии по сравнению с обработкой при давлении 276 МПа, т. е. повышение давления воды приводит к снижению затрат энергии на обработку.

Рассмотрена производительность метода гидроабразивной резки различных материалов. Показано, что повышение производительности прямо пропорционально повышению рабочего давления. Установлено, что свойства обрабатываемого материала определяют затраты энергии на гидроабразивную резку, повышение давления воды приводит к снижению затрат энергии на обработку. Исходя из этого можно рекомендовать режим гидроабразивной резки с давлением 414 МПа, что обеспечит производительность в 2 раза выше по сравнению с режимом 276 МПа при повышении затрат энергии на 10 %.

Литература

1. Основы технологии водоабразивной обработки деталей машин / С. В. Усов, Ю. Ф. Назаров, Д. С. Свириденко [и др.]. – Подольск : Слав. шк., 2010. – 148 с.
2. Смоленцев, В. П. Формирование поверхностного слоя при гидроабразивном разделении металлов с наложением электрического поля / В. П. Смоленцев, Е. В. Гончаров // Вестник ВГТУ. – 2011. – Т. 7, № 7. – С. 74–77.
3. Полянский, С. Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки / С. Н. Полянский, А. С. Нестеров // Вестник машиностроения. – 2004. – № 5. – С. 43–46.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК НЕФТЕШЛАМА НА СМАЧИВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ И АДГЕЗИЮ БИТУМА

В. Ю. Писарев

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

Научный руководитель И. И. Злотников

Проблема коррозионного разрушения металлических конструкций и оборудования остро стоит перед нефтегазовой отраслью, так как добыча, переработка, транспортировка и хранение нефти и нефтепродуктов связана с применением трубопроводов большой протяженности и использованием крупногабаритного нефтегазопромыслового оборудования. Одним из экономичных и эффективных вариантов их противокоррозионной защиты являются применение битумных материалов, что связано с простой технологией их изготовления и дешевизной компонентов. Рассмотрено влияние нефтяного шлама на смачивающие и адгезионные свойства битума по отношению к стальным поверхностям. Установлено, что битум, модифицированный нефтешламом, увеличивает смачивающую способность и адгезионные свойства.

Ключевые слова: защита от коррозии, нефтяной битум, нефтешлам, смачиваемость, адгезия.

Защита от коррозионного разрушения стальных трубопроводов и нефтепромыслового оборудования является важной задачей современной нефтяной промышленности. Одним из наиболее экономичных и эффективных способов, обеспечивающих противокоррозионную защиту, является применение битумных покрытий, что связано с простой технологией их изготовления и дешевизной компонентов. Однако в чистом виде битумы не могут обеспечить требуемую долговечность и надежность защитных покрытий. Дисперсные минеральные наполнители (мел, каолин, окислы металлов и др.) повышают механическую прочность битумов, но снижают их эластичность и повышают хрупкость, что может приводить к отслаиванию защитных покрытий. Пластифицирующие добавки, к которым относятся, в первую очередь, минеральные масла, увеличивают липкость битума и снижают его хрупкость, но при этом уменьшают механическую прочность и теплостойкость. Кроме того, минеральные масла имеют высокую стоимость. Поэтому необходимо решить сложную задачу – с одной стороны, повысить жесткость и механическую прочность исходного битума, а с другой – увеличить эластичность и липкость (адгезию) материала.

Основываясь на литературные данные [1] и ранее проведенные исследования [2, 3], эту задачу предполагалось решить путем введения в состав битума нефтяного шлама Мозырского нефтеперерабатывающего завода, который образуется в процессе дренирования и пропарки нефтепроводов и резервуаров для хранения и транспортирования нефти. Нефтешлам имеет плотность 880–910 кг/м^3 и представляет собой смесь нефтепродуктов, воды и механических примесей. Механические примеси состоят из оксидов металлов (в основном железа) с небольшим содержанием глинисто-песчаных пород, а в нефтепродуктах присутствует небольшое количество асфальтосмолопарафиновых веществ. Состав (мас. %) используемых образцов нефтешлама следующий: вода – 15–20; механические примеси – 8–14; нефтепродукты – остальное. Можно предположить, что дисперсные механические примеси будут повышать прочность битума, а нефтепродукты снизят хрупкость и повысят его адгезию к стали.

Битумную смесь для проведения исследований готовили следующим образом. В металлическую емкость загружали битум марки БН 70/30 и нефтешлам, разогре-

вали до температуры 80–90 °С и выдерживали до полного испарения воды. Затем температуру повышали до 150–160 °С, тщательно перемешивали и использовали полученный расплав для изготовления образцов.

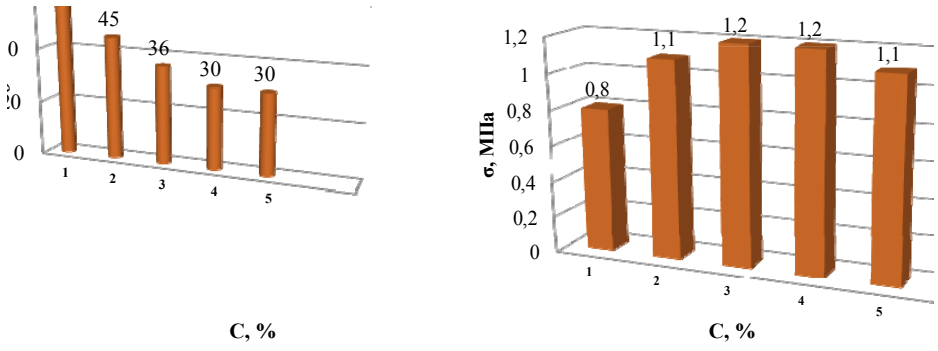
Качество защитных битумных покрытий определяется, в первую очередь, степенью сцепления (адгезией) битума со стальной поверхностью, а адгезия зависит от смачивающей способности расплава битума по отношению с металлической поверхности. Смачивающую способность оценивали по величине краевого угла смачивания битумом стальной поверхности, который определяли методом лежачей капли. Для этого каплю расплава битума стеклянной палочкой наносили на поверхность фольги толщиной 0,1 мм из стали марки Ст 3. После ее растекания и формирования равновесной формы проводили фотографирование профиля капли вэб-камерой. На рис. 1 приведен типичный вид сформированной капли битумной смеси на поверхности стали.

а) *б*) *в*)

Рис. 1. Капля битума на поверхности стальной фольги (*а*);
профиль той же капли (*б*); измерение краевого угла смачивания (*в*)

Прочность сцепления (адгезиию) битума со стальной поверхностью определяли методом нормального отрыва стальных цилиндрических образцов диаметром 20 мм, склеенных основаниями расплавом исследуемого состава на разрывной машине (ГОСТ 32299-2025).

На рис. 2, *а* приведена зависимость краевого угла смачивания θ битумом поверхности стали, а на рис. 2, *б* – зависимость адгезии битума к стали от содержания в нем нефтешлама *С*, мас. %.



а) *б*)

Рис. 2. Влияние содержания нефтешлама *С*, мас. % на величину краевого угла смачивания θ битумом поверхности стали (*а*) и адгезии σ битума к стали (*б*):
1 – битум исходный; *2* – 5; *3* – 10; *4* – 15; *5* – 20

На основании проведенного исследования за рекомендуемое содержание нефтешлама в битуме принято 10–15 %.

Для определения коррозионной стойкости защитных покрытий изготавливали образцы путем нанесения расплава кистью на образцы из стальной фольги. Были испытаны покрытия из чистого битума и битума, содержащего 12 мас. % нефтешлама.

Испытания проводили по следующим показателям:

1. Стойкость к статическому воздействию воды при 20 ± 2 °С, ГОСТ 5631-79 (48 ч).

2. Стойкость к статическому воздействию 3%-го раствора NaCl при 20 ± 2 °С, ГОСТ 5631-79 (3 ч).

3. Определение адгезии методом решетчатого надреза, ГОСТ 31149-2014, до и после воздействия агрессивных сред.

Визуальный осмотр образцов после проведения испытаний показал:

1. Оба покрытия выдержали требования, предусмотренные ГОСТом по коррозионной стойкости в 3%-м растворе NaCl.

2. На поверхности образцов покрытия из чистого битума после 48 ч выдержки в воде появились мелкие дефекты в виде вздутий, и адгезионная прочность значительно ухудшилась, а у покрытия, содержащего 12 % нефтешлама, осталась без изменения.

Таким образом, проведенные исследования показали, что использование отходов нефтеперерабатывающего производства (нефтешлама) позволяет значительно улучшить адгезионные свойства и коррозионную стойкость битума. Этот результат можно использовать при разработке новых битумных материалов для защиты металлоконструкций от воздействия неблагоприятных факторов. Кроме того, использование рассмотренных отходов позволит частично решить проблему их утилизации и снизить себестоимость готовой продукции.

Литература

1. Сафин, С. Г. Битумно-полимерные гидроизоляционные материалы с использованием нефтешламов / С. Г. Сафин, А. Н. Черепанов, И. А. Шиганов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2020. – № 3 (294). – С. 51–54.
2. Дубодел, В. П. Гидроизоляционные битумные материалы с использованием отходов нефтеперерабатывающего и масложирового производства / В. П. Дубодел, И. И. Злотников, В. М. Шаповалов // Материалы, технологии, инструменты. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 54–57.
3. Разработка битумно-полимерного композиционного материала для защиты и ремонта нефтепромысловых трубопроводов и оборудования от коррозионных и механических повреждений / Т. В. Атвиновская, В. П. Дубодел, И. И. Злотников, В. М. Шаповалов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 2 (101). – С. 33–40.

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ СТАЦИОНАРНЫХ РОБОТОВ С ЦИКЛОВОЙ И ЧИСЛОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Э. А. Гордеенко

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Рассмотрена современная автоматизация производства, где соответственно особую роль играют промышленные роботы, которые обеспечивают высокую точность и производительность технологических процессов. Для обеспечения правильной функциональности са-

мого робота объясняется важность и суть планирования траекторий движения роботов с цикловой и числовой системами управления. Рассмотрены принципы формирования траекторий в указанных системах, их основные характеристики, преимущества и ограничения. Установлено следующее: цикловые системы управления отличаются простотой реализации, однако обладают ограниченной гибкостью при построении сложных траекторий, а роботы с ЧПУ позволяют реализовывать более сложные и оптимизированные траектории движения за счет применения методов интерполяции и алгоритмического управления, что исключает недостатки, приведенные в цикловой системе управления.

Ключевые слова: промышленные роботы, планирование траектории, стационарные роботы, цикловое управление, числовое программное управление, ЧПУ, интерполяция, робототехнические системы, автоматизация производства, управление движением.

Первоначально рассмотрим цикловое программное управление. Системой циклового программного управления называют комплекс устройств, в котором программируется цикл работы промышленного робота, а величины перемещений рабочих органов задаются с помощью предварительно настраиваемых путевых выключателей. Настройка путевых переключателей выполняется оператором и является довольно трудоемким процессом. Циклом работы оборудования называют совокупность элементарных рабочих и вспомогательных операций, называемых этапами цикла. Они осуществляются в определенной последовательности, необходимой для выполнения оборудованием рабочих функций.

В системе циклового программного управления роботами применяется циклический подход, где программа робота выполняется повторно в цикле. В каждом цикле робот выполняет определенные команды, опираясь на информацию из сенсоров и других источников данных. Таким образом, робот может обновлять свои действия и адаптироваться к изменениям внешней среды или требованиям задачи.

Стационарные роботы не способны к перемещению, соответственно в формировании рабочей зоны участвуют предельные положения: минимальное и максимальное. Формируются данные положения на основе нулевого положения, т. е. когда все звенья задвинуты, и максимального, т. е. нужно учитывать максимальное выдвижение последнего звена относительно инструментальной системы координат. Максимальное и минимальное положение схвата и будет определять рабочую зону робота, но это в только в том случае, если нет никакого препятствия. Некоторые роботы способны к программированию на регулируемые величины, и есть возможность проконтролировать обход препятствия и прибыть в нужную нам точку за более короткий промежуток времени. Роботы с нерегулируемой величиной перемещения это могут выполнять дольше, а некоторые задачи и вовсе не сумеют, если относительно сложная рабочая зона для перемещения.

Рассмотрим пример промышленного робота «РИТМ-05», функционирующего на системе управления УЦМ-20. Промышленный робот «РИТМ-05» предназначен для автоматизации технологических процессов в условиях серийного и мелкосерийного производства.

Промышленный робот должен выполнять следующие функции:

– транспортирование полуфабриката из магазинного устройства в зону обработки;

– съем и транспортирование полуфабриката в приемное, приемно-передающее устройство и т. д.;

– управление рабочими циклами основного и вспомогательного технологического оборудования.

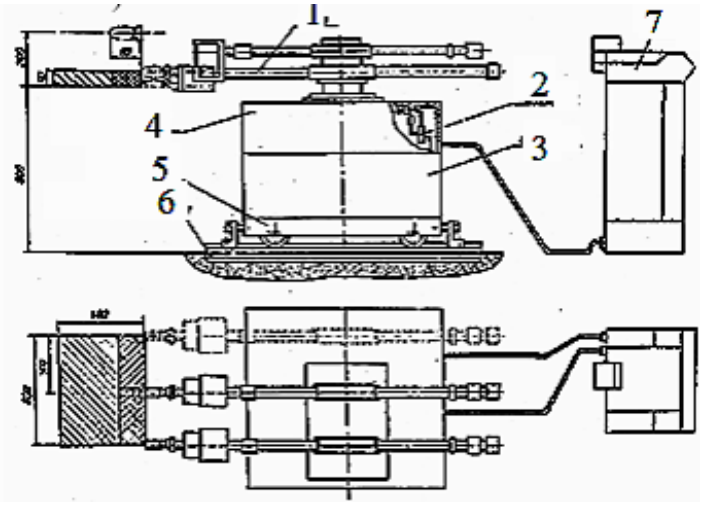


Рис. 1. Общий вид промышленного робота «РИТМ-05»

Общий вид робота представлен на рис. 1, где можно увидеть рабочую зону, которая отображена штриховой линией с размерами. Рис. 2 отображает направления осей координат с номерами точек позиционирования, и кружки в цифрах отображают предельные положения при задвинутой поднятой рукой, либо же сдвинутой, и выдвинутую руку в верхнем и нижнем положении. Все это отображено со стороны робота, захвата.

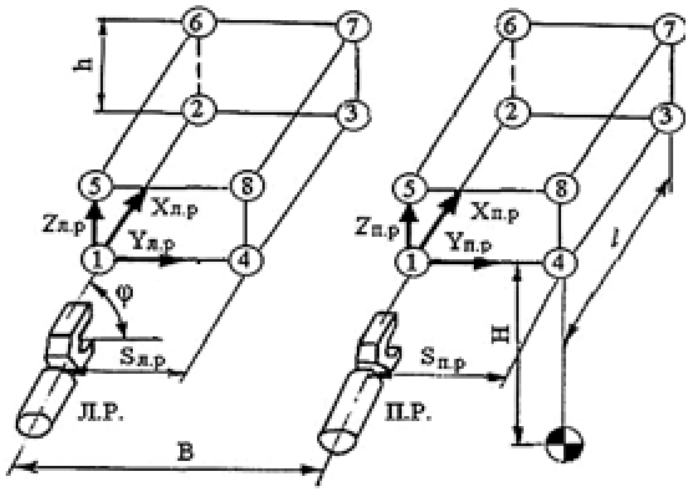


Рис. 2. Направления осей координат с номерами точек позиционирования

Из особенностей данного робота хочется отметить, что он обладает двумя руками, которые программируются по отдельности, т. е. выдвижения и задвижения рук происходят по отдельности, сдвиг каретки, на которой установлены руки, соответственно происходит одновременно, поэтому нужно учитывать рабочее пространство, чтобы вторая рука ни во что не врезалась даже при нулевом положении одной из рук, т. е. полностью задвинутой.

При цикловой системе управления все движения, как упомянуто ранее, происходят от действия к действию, и траектория в таких роботах описывается прямой линией и окружностью. Окружностями редко описывается, но все же есть роботы, обладающие какой-либо поворотной колонной, к примеру, промышленный робот «РФ-204М» (рис. 3).

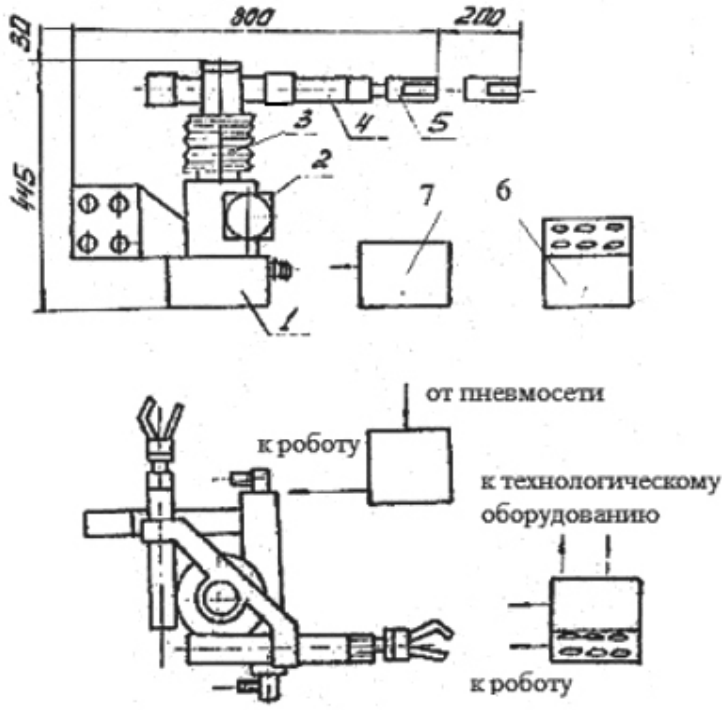


Рис. 3. Промышленный робот «РФ-204М»

В заключение по поводу цикловых роботов хочется отметить, что цикловое программное управлени – это самый простой тип управления промышленными роботами, где движение задается в виде последовательности фиксированных циклов; рабочая зона характеризуется предельными положениями, а предельные положения – способны с помощью упоров; управление часто реализуется по разомкнутому циклу и информация задается дискретно. На траектории это сказывается таким образом: траектория жестко задана и не оптимизируется; движение – чаще всего линейное (простая интерполяция) или ступенчатое, а также практически нет адаптации к изменениям среды.

Перейдем к числовому программному управлению. Числовое программное управление (ЧПУ) – это технология управления механическим движением и рабочими процессами с использованием цифровой информации. Она представляет собой базовую технологию современного машиностроения, объединяющую традиционные технологии механического производства, компьютерные технологии, современные технологии управления, технологии сенсорного контроля, сетевые коммуникационные технологии и оптоэлектромеханические технологии. Эта технология характеризуется высокой точностью, эффективностью и гибкой автоматизацией, играя ключевую роль в реализации гибкой автоматизации, интеграции и интеллектуализации в производственной сфере.

В промышленных роботах с ЧПУ используется цифровая управляющая программа, где траектория задается через координаты и математические зависимости; применяется интерполяция (линейная, круговая, сплайны) для плавности траектории движении.

Перейдем сразу к примеру одного из роботов с ЧПУ, им является «HIWIN RA605». Промышленный робот HIWIN серии RA605 представляет собой 6-осевой шарнирно-сочлененный робот, содержащий шарнирный рычаг с возможностью захвата. Используется он для точного монтажа, комплексной обработки, манипулирования заготовкой, а также для выполнения таких функций, как подъем/перемещение, обработка, монтаж, удаление заусенцев, шлифовка и полировка.

Рис. 4. Общий вид робота «HIWIN RA605»:
1 – шестиосевой робот; *2* – соединительный кабель; *3* – система управления (HIWIN ROBOT SYSTEM SOFTWARE – HRSS);
4 – пульт управления

В связи с наличием шести поворотных осей возможность работы самого робота в каких-либо труднодоступных местах повышается. Рабочая зона характеризуется все также предельными положениями, т. е. максимальное предельное положение и минимальное. Если в цикловых системах управления конструкция робота не особо сложная, упрощенная в каком-то плане, так как не нуждается во множестве звеньев, то в роботах с числовой системой управления – в точности, наоборот. Предельные положения этого робота характеризуются поворотами этих осей. Диапазон поворота осей робота, град: 1-я ось – (±165°); 2-я ось – (+85° ~ –125°); 3-я ось – (+185° ~ –55°); 4-я ось – (±190°); 5-я ось – (±115°); 6-я ось – (±360°). На рис. 5 представлены габаритные размеры самого робота, а также его рабочая зона.

На рис. 5 отображена рабочая зона с помощью окружностей на максимально предельное расстояние и минимальное, если обратить внимание на рис. 5, то там имеется точка *P*, которая является началом инструментальной системой координат данного робота. С помощь ЧПУ мы можем регулировать буквально все, чтобы перемещение или какая-либо операция выполнялась быстрее и с лучшей точностью. Мы можем регулировать ускорение по достижению заданной точки, регулировать линейность нашей траектории, имеется ввиду, насколько сглаженной она будет, но в рамках нашей рабочей зоны. Задается программа в координатах через (*X*, *Y*, *Z*), что и дает нам понимание о регулируемости величин перемещения. Сглаживаемость движения может позволить нам обходить какие-либо препятствия в рабочей зоне для достижения быстрого достижения точки назначения, а также в случае, если деталь хрупкая, то доставить ее без повреждений.

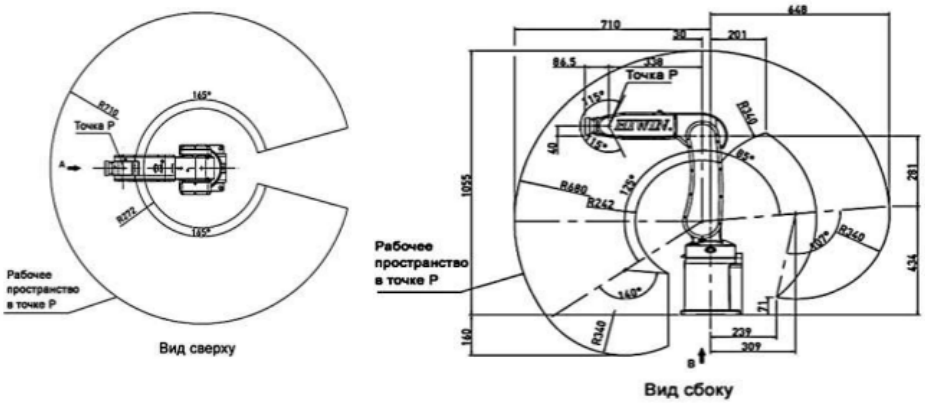
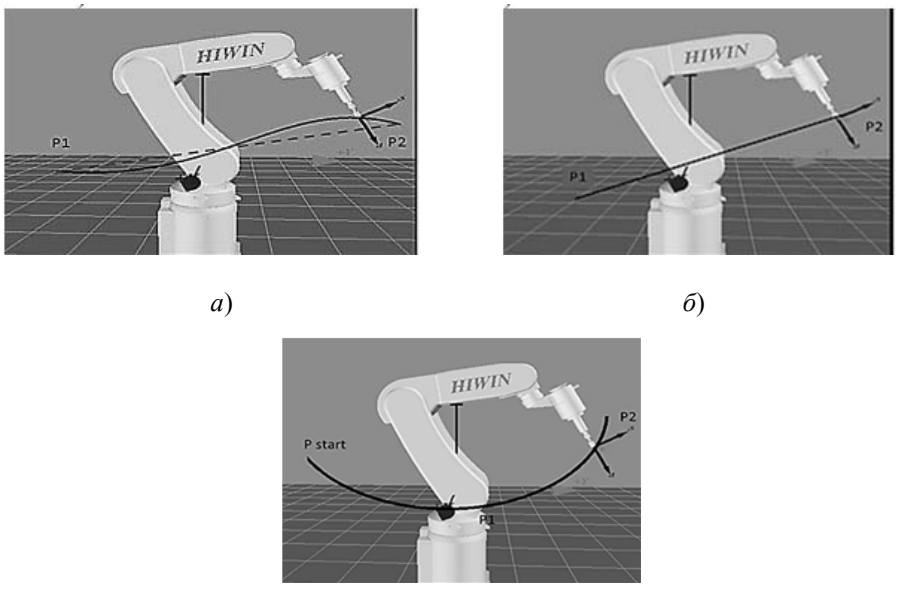


Рис. 5. Рабочая зона робота



а) *б*)

в)

Рис. 6. Перемещение промышленного робота:
а – из точки *P*1 в точку *P* по типу перемещения «от точки к точке»;
б – линейное перемещение с заданной скоростью;
в – круговое перемещение по окружности

В заключение, говоря о числовой системе управления ЧПУ (числовое программное управление), можно отметить, что это более развитая система, где движение задается программно через координаты и алгоритмы. Из основных особенностей хочется отметить, что используется цифровая управляющая программа; траектория движения робота задается через координаты и математические зависимости, где применяется интерполяция (линейная, круговая, сплайны). Таким образом, числовая система управления позволяет строить сложные криволинейные траектории, в которых учитывается скорость, ускорение, т. е. она регулируемая нами в программе. ЧПУ позволяет реализовать гибкое и точное планирование траекторий, включая сложные формы движения.

Литература

1. Лукинов, А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств : учеб. пособие / А. П. Лукинов. – СПб. : Лань, 2012. – 608 с.
2. Околов, А. Р. Программное обеспечение промышленных роботов : учеб.-метод. пособие для студентов учреждений высш. образования по специальностям 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств», 1-53 01 06 «Промышленные роботы и робототехнические комплексы» / А. Р. Соколов, Ю. Н. Матрунчик. – Минск : БНТУ. 2021. – 66 с.
3. Серебряницкий, П. Н. Программирование для автоматизированного оборудования : учеб. для средн. проф. учеб. заведений / П. П. Серебряницкий, А. Г. Схиртладзе ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк. – 2003. – 592 с.
4. Робот HIWIN RA605 : рук. по эксплуатации.
5. Роботы промышленные. Устройства циклового, позиционного и контурного программного управления : ГОСТ 27697-88.
6. ПР «РФ-204М» : рук. по эксплуатации
7. Спыну, Г. А. Промышленные роботы. Конструирование и применение : учеб. пособие / Г. А. Спыну. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Выща шк., 1997. – 311 с.
8. ПР «Ритм-05» : рук. по эксплуатации

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОСТИ РАЗРЫВА НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛАМИДОВ НА ТРАДИЦИОННЫХ ТИПАХ КОЛЛЕКТОРА

В. Д. Ткачева

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

Научный руководитель И. С. Шепелева

Проблема повышения эффективности разработки традиционных карбонатных и терригенных коллекторов требует внедрения новых технологических решений в области интенсификации притока. Посвящена анализу применения синтетических полимеров в качестве основы для жидкостей разрыва. В отличие от классических гуаровых систем данные составы обладают специфическими реологическими свойствами, позволяющими оптимизировать геометрию трещины и минимизировать загрязнение продуктивного пласта. Основное внимание уделено адаптации концентраций реагентов и деструкторов под условия пластов с различными фильтрационно-емкостными свойствами. Проведенная оценка, которая охватывает широкий спектр объектов, включая как успешные сценарии полной замены гелеобразователя, так и комбинированные подходы в рамках гибридных технологий. Натурные испытания позволили определить технологические границы применимости сухих и жидких форм полимера, а также выявить необходимость модернизации стандартного парка оборудования для обеспечения стабильности процесса закачки.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, полиакриламид, традиционный коллектор, жидкость разрыва, синтетический полимер, проппантонесущая способность, гибридный график закачки, технологическая эффективность, деструкция геля.

Основной задачей являлась оценка технологической эффективности данных жидкостей, которые характеризуются низкими потерями на трение и высокой проппантонесущей способностью по сравнению с традиционными гуаровыми составами.

Концепция проведения данных испытаний строилась на необходимости поиска эффективной альтернативы традиционным гуаровым составам при освоении месторождений Республики Беларусь с карбонатными и терригенными коллекторами. Основная идея заключалась в том, чтобы адаптировать рецептуры на основе полиакри-

ламида (ПАА), которые ранее успешно применялись на нетрадиционных залежах, под условия традиционных объектов. Видение разработчиков предполагало, что синтетическая жидкость позволит значительно снизить потери давления на трение и обеспечит высокую проппантонесущую способность за счет повышенных упругих свойств полимера.

Важным технологическим преимуществом виделось то, что такие составы обладают низкой вязкостью, помогая ограничивать высоту трещины и направлять энергию на увеличение ее полудлины, что критически важно для эффективного дренирования пласта. Кроме того, использование ПАА открывало возможность проводить работы без дорогостоящего предварительного нагрева воды, если ее температура превышает 10 °С. Экономическая стратегия исследования также опиралась на минимизацию затрат: предполагалось, что внедрение сухой формы ПАА, стоимость которой значительно ниже жидких аналогов и биополимерных систем, позволит существенно удешевить процесс гидроразрыва пласта (ГРП) в текущей мировой экономической ситуации. В целом испытания рассматривались как способ создания более чистой и эффективной технологии, обеспечивающей низкое остаточное загрязнение пласта и повышенную проводимость созданных трещин по сравнению со стандартными гуаровыми составами.

В ходе реализации программы опытно-промышленных испытаний в период с 2022 г. по ноябрь 2025 г. было выполнено 97 операций ГРП на 36 скважинах, что позволило детально оценить границы применимости новой технологии. Основной массив данных подтвердил, что наиболее надежным и универсальным решением является использование ПАА в качестве буферной жидкости в рамках гибридных технологий закачки, где основная транспортировка проппанта ложится на биополимерные составы. Практический опыт показал, что такая схема сработала успешно в 54 случаях из 56, что позволяет рекомендовать использование ПАА на буферных стадиях для всех исследуемых залежей.

Однако при попытках перейти на использование синтетической жидкости в полном объеме результаты оказались неоднозначными и сильно зависели от геологических условий конкретного объекта. Например, на задонском горизонте Речицкого месторождения технология продемонстрировала высокую эффективность, позволив успешно выполнить 34 стадии с высокими концентрациями расклинивающего агента. В то же время на воронежской залежи того же месторождения использование ПАА для транспортировки проппанта привело к массовым отклонениям и резкому росту давления, что связывают с негативным влиянием кислоты при проведении МКПГРП на реологические свойства полимера и сложными пластовыми напряжениями.

Серьезным вызовом стала техническая сторона процесса, особенно при работе с сухой формой реагента. Выяснилось, что из-за очень короткого времени гидратации ПАА стандартное оборудование не справляется с нагрузкой: блендеры не могли поддерживать заданное давление подпора, а насосы работали с перебоями при высокой концентрации полимера. Это потребовало оперативной модернизации гидратационных установок МН25 и изменения схем подключения техники для ускорения приготовления жидкости разрыва. Исследование также выявило, что жидкая форма ПАА хотя и является более дорогой, обеспечивает гораздо более высокую технологичность и стабильность процесса, позволяя использовать стандартный набор единиц флота ГРП. В конечном итоге был сформирован перечень объектов, таких как залежи Речицкого, С-Домановичского и других месторождений, где синтетическая

жидкость рекомендована к полномасштабному внедрению, и определены зоны, где ее использование должно быть ограничено только буферными стадиями из-за рисков «СТОП-давлений».

Подводя итоги опытно-промышленных испытаний, можно утвердительно заявить о перспективности интеграции полиакриламидных систем в практику освоения традиционных месторождений. Технология подтвердила свою высокую надежность при использовании в качестве буферной стадии, что позволяет рекомендовать ее для повсеместного внедрения в гибридных схемах ГРП. Переход на полный цикл закачки на основе ПАА показал избирательную эффективность: метод демонстрирует превосходные результаты на объектах с умеренными пластовыми напряжениями, однако требует осторожного подхода на залежах со сложной расчлененностью или при совместном использовании с кислотными составами.

Важным выводом стала необходимость технического перевооружения: для массового использования наиболее экономически выгодной сухой формы ПАА требуется внедрение специализированных узлов гидратации, способных работать с мгновенно меняющейся вязкостью среды. Дальнейшее развитие технологии должно быть сосредоточено на мониторинге долгосрочного дебита скважин, что позволит окончательно подтвердить преимущество синтетических жидкостей в сохранении естественной проводимости коллектора. Полученный в ходе испытаний опыт служит фундаментом для оптимизации существующих регламентов и перехода к более чистым и экономически оправданным методам интенсификации добычи нефти.

Литература

1. Овчинников, В. П. Технологии интенсификации притока нефти из пласта : учеб. пособие для вузов / В. П. Овчинников, Т. В. Грошева, Я. С. Овчинников. – Тюмень : ТИУ, 2020. – 345 с.
2. Опыт применения гибридных технологий ГРП на месторождениях Припятского прогиба / С. В. Демьяненко [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 15–23.
3. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений : учеб. для студентов вузов / под ред. И. Т. Мищенко. – М. : Нефть и газ, 2021. – 448 с.
4. Порошин, В. В. Д. Разработка нефтяных и газовых месторождений : учеб. пособие / В. Д. Порошин, С. В. Козырева, С. Л. Порошина ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. тех. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024. – 399 с.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНАСТИ ФЛАНЦА ПРИВОДА ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО БАРАБАНА КОМБАЙНА «Палессе FS8060»

Б. И. Долгий

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

Научный руководитель Е. М. Акулова

Выполнен анализ причин потери работоспособности фланцевых соединений сельскохозяйственной техники на примере детали «Фланец КВС-1-0130604» узла привода измельчающего барабана комбайна «Палессе FS8060». Материалом для исследования послужили детали, находящиеся на балансе КСУП «Речецкий Агро». Рассмотрены конструктивные особенности фланца, а также условия его эксплуатации: высокие динамические и вибрационные нагрузки, запыленность, перепады температур, воздействие агрессивных сред. Выявлены и систематизированы основные дефекты деталей типа фланец: абразивный износ

и загрязнение резьбы, вибрационное самооткручивание, термоциклическое коробление привалочных плоскостей, электрохимическая и щелевая коррозия, а также повреждения конусной поверхности при некачественном монтаже. Описан механизм возникновения каждого дефекта и проанализированы последствия, приводящие к разрушению фланца и простою техники.

Ключевые слова: фланец КВС-1-0130604, привод измельчающего барабана, потеря работоспособности, типовые дефекты фланцев, условия эксплуатации сельскохозяйственной техники.

В сельскохозяйственном машиностроении фланцевые соединения используются повсеместно для соединения гидравлических агрегатов, трубопроводов, корпусных деталей трансмиссий, а также для крепления навесного оборудования. Так, в номенклатуре деталей, выпускаемых ОАО «Гомсельмаш», насчитывается более 16 тыс. деталей типа «фланец». Например, конструкция комбайна КВС-80-7 включает 94 фланца [1]. От них зависит эффективность работы не только гидравлической системы, но и эффективного рабочих органов технологического тракта, трансмиссии и ходовой части комбайна.

Специфика работы комбайна накладывает жесткие требования к надежности стыков в условиях высоких вибраций, запыленности, перепадов температур, воздействия агрессивных сред (удобрения, остатки растений) и, зачастую, низкой квалификации обслуживающего персонала в полевых условиях [2].

Цель данной работы: на примере деталей, находящихся на балансе КСУП «Речецкий Агро», провести анализ причин потери работоспособности фланцевых соединений сельскохозяйственной техники ОАО «Гомсельмаш».

В качестве характерного примера, наглядно иллюстрирующего конструктивные особенности и типичные проблемы фланцевых соединений в агрегатах кормоуборочных комбайнов, был рассмотрен узел привода измельчающего барабана комбайна «Палессе FS8060». Деталь «Фланец КВС-1-0130604» входит в узел привода измельчающего барабана КВК 0130000 и является ключевым связующим элементом между силовым приводом и рабочим органом.

По конструкции деталь «Фланец КВС-1-0130604» представляет собой тело вращения, содержит конусную внутреннюю поверхность и шесть глухих отверстий М12-7Н для фиксации со ступицей КВС-1-0130606 данного узла. Двенадцать отверстий М12-7Н предназначены для крепления «Фланца КВС-1-0130604» к шкиву КВК0130115 данного узла.

Данный фланец работает в условиях интенсивных динамических нагрузок (передача крутящего момента от шкива к ступице измельчающего барабана), подвержен вибрациям, а также находится в зоне повышенного загрязнения (остатки растительной массы, абразив). Анализ конструкции и условий эксплуатации этой детали позволяет выявить основные «зоны риска», характерные для фланцевых соединений сельскохозяйственной техники [3].

В результате анализа поломок деталей сельскохозяйственной техники, находящейся на балансе КСУП «Речецкий Агро», были выявлены следующие типовые дефекты фланцевых деталей:

1. Абразивный износ и загрязнение резьбы. Проблема заключается в том, что в отличие от стационарного оборудования фланцы на комбайнах работают в среде пыли, почвы и растительных остатков. Резьба шпилек и болтов забивается абразивом, что приводит к «срыву» резьбы при попытке демонтажа в период напряженной уборочной.

Последствием является невозможность быстрой замены гидравлического насоса или мотора в поле. Обрыв шпилек требует высверливания, что ведет к многодневным простоям.

Для фланца КВС-1-0130604, имеющего 18 резьбовых отверстий (12 + 6), повреждение резьбы хотя бы в нескольких из них делает невозможной качественную затяжку соединения, что приводит к биению шкива и повышенной вибрации всего привода. Восстановление резьбы требует особой точности из-за жестких требований к соосности.

2. Вибрационное самооткручивание и потеря затяжки. Проблема заключается в том, что фланцы, установленные на измельчающих барабанах (как в рассматриваемом узле), испытывают интенсивную знакопеременную нагрузку и вибрацию широкого спектра.

Последствием является то, что гайки фланцев раскручиваются за 2–3 смены работы, если не применены пружинные шайбы (гроверы) или фиксаторы резьбы. Потеря герметичности (если соединение работает с маслом) приводит к утечке, что на комбайне создает риск возгорания. Для фланца привода измельчающего барабана ослабление крепления к шкиву приводит к дисбалансу, ускоренному износу подшипников и возможному разрушению шпоночного соединения.

3. Термоциклирование и потеря геометрии уплотнительных поверхностей. Проблема заключается в том, что двигатели и гидравлика комбайнов работают в режиме резких перепадов нагрузки. Хотя сам фланец КВС-1-0130604 не подвергается прямому термическому воздействию, он работает в паре с другими элементами, которые могут нагреваться при длительной работе. Перепады температур и знакопеременные нагрузки приводят к короблению привалочных плоскостей.

Последствием является потеря плоскостности опорных поверхностей фланца.

Для фланца КВС-1-0130604, который крепится к шкиву по 12 отверстиям, даже незначительное коробление (более 0,05 мм) нарушает параллельность поверхностей, что при затяжке создает неравномерное распределение нагрузки и может привести к разрушению фланца или срыву резьбы.

4. Электрохимическая и щелевая коррозия. Проблема заключается в том, что в сельскохозяйственной технике часто соединяются разнородные металлы. Фланец КВС-1-0130604 (стальной) контактирует со ступицей и шкивом. В условиях использования минеральных удобрений и химикатов, попадающих на узлы, возникает интенсивная гальваническая коррозия.

Последствием является то, что коррозия развивается в зоне контакта деталей и в резьбовых соединениях.

Для фланца КВС-1-0130604 это проявляется в виде «прикипания» резьбовых соединений, что делает демонтаж невозможным без применения грубой силы, приводящей к срыву шпилек или разрушению самого фланца. Также коррозия может поражать конусную внутреннюю поверхность фланца, нарушая точность посадки на ступицу.

5. Повреждение конусных и опорных поверхностей при монтаже/демонтаже. Проблемой является низкая культура производства при ремонте в полевых условиях. Частое использование «жестянок» вместо штатных прокладок, затяжка фланцев «кувалдой» (через монтировку) вместо динамометрического ключа. Последствием является перекос фланца, задиры конусной поверхности.

Для фланца КВС-1-0130604 конусная внутренняя поверхность является критическим элементом, обеспечивающим центрирование на ступице. Появление задиров,

рисок или локального износа на этой поверхности нарушает соосность, вызывает биение барабана и, как следствие, повышенную вибрацию и преждевременный выход из строя подшипников. Восстановление такой поверхности требует нанесения износостойкого слоя с последующей механической обработкой до номинальных размеров.

Результаты проведенного анализа могут быть использованы для повышения эффективности восстановительных работ деталей типа «фланец», выбора оптимальных технологии восстановления.

Литераура

1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации кормоуборочного комбайна «Палессе FS8060» / ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2015. – 312 с.
2. Земсков, В. И. Эксплуатация и ремонт гидравлических систем сельскохозяйственной техники / В. И. Земсков, В. Л. Попов. – Минск : Ураджай, 2017. – 248 с.
3. Лазаревич, А. Н. Повышение надежности фланцевых соединений трансмиссий кормоуборочных комбайнов / А. Н. Лазаревич // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2019. – № 6. – С. 32–35.

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОДБОРУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ С УЧЕТОМ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕГИОНОВ (НА ПРИМЕРЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)

А. О. Малышко

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

Научный руководитель Т. В. Атвиновская

Рассмотрен вопрос оптимизации состава технологических жидкостей, в частности, буровых растворов для геологических условий Калининградской области. Проведен анализ геолого-технических особенностей региона, которые влияют на бурение скважин и разработку месторождений. Исходя из особенностей геологического разреза будут представлены конкретные рекомендации по подбору технологических жидкостей (буровых растворов) для эффективного бурения и минимизации техногенного воздействия на окружающую среду. Особое внимание будет уделено модификациям буровых растворов типа Катбурр для обеспечения устойчивости стенок скважины и снижению экологических рисков.

Ключевые слова: технологические жидкости, буровые растворы, буровые растворы типа «Катбурр», геология, геолого-технические особенности, нефтедобыча, Калининградская область.

Эффективность строительства скважин обусловлена качеством используемых технологических жидкостей, а в частности, правильностью подбора буровых растворов. При несоответствии реологических, ингибирующих и фильтрационных свойств буровых растворов геологическим условиям возможны осложнения при бурении: обвал стенок и сужение ствола скважины, аварии и поглощения. Калининградская область представляет собой регион со сложным геологическим строением, требующим комплексного подхода к выбору технологических жидкостей.

Территория Калининградской области расположена в пределах западной части Балтийской синеклизы Русской платформы. Геологический разрез этой местности характеризуется мощным чехлом осадочных пород, что подразумевает под собой

специфические технические условия бурения нефтедобывающих скважин. Стратиграфические особенности обусловлены Четвертичными, Палеогеновыми, Меловыми и Юрскими отложениями [1].

Четвертичные отложения представлены ледниковыми, водно-ледниковыми и морскими отложениями такими, как пески, супеси, глины и валуны. Причина нестабильности этих отложений связана с тем, что генезис отложений связан с деятельностью древних ледников, что, в свою очередь, обуславливает высокую неоднородность и наличие зон разуплотнения. Также характерны глинистые фракции, которые склонны к набуханию при контакте с пресной водой. Таким образом, при разработке данных слоев присутствует высокий риск обвалов и сужения ствола скважины в интервалах до 100–150 м, а также необходимость крепления кондуктора на глубину, которая исключает пресноводные горизонты.

Палеогеновые отложения включают в себя глауконитовые пески и глины, содержащие янтарь. Так как генезис этих осадочных морских слоев происходил в условиях мелководья, песчаные прослои часто либо несцементированы, либо слабо сцементированы. Вследствие этого данные геологические слои характерны высокой абразивностью пород, что приводит к износу породоразрушающего инструмента и высоким риском кавернообразований.

Меловые и Юрские отложения представлены мергелем, глинами и писчим мелом. Карбонатный состав меловых отложений чувствителен к химическому загрязнению, а Юрские глины обладают высокой активностью. В связи с этим возникает необходимость контроля кальциевой жесткости бурового раствора и риск прихватов инструмента.

Следует отметить, что Калининградская область характеризуется высокой обводненностью и наличием нескольких водоносных горизонтов, имеющих хозяйственное значение. Также близость Балтийского моря и Куршского залива накладывает строгие экологические ограничения на состав буровых растворов, т. е. запрет на использование токсичных реагентов и нефтепродуктов. Однако геотермический градиент при бурении – относительно низкий, что позволяет использовать термостабильные полимеры без риска деструкции.

Буровые растворы типа «Катбурр» представляют собой полимерно-солевой ингибирующий раствор на водной основе, которые предназначен для бурения неустойчивых горных пород. К преимуществам системы «Катбурр» можно отнести повышенные ингибирующие и крепящие свойства, высокую стабильность свойств и устойчивость к полисолевой и температурной агрессиям, независимость показателей раствора от pH, отсутствие биодеструкции полимеров, а также экологичность – данная система буровых растворов уменьшает объем шлама на 35 % за счет снижения кавернозности и набухания глин [2].

Для условий Калининградской области возможно применение систем «Катбурр» с некоторыми модификациями. Например, при бурении в интервале под кондуктор и эксплуатационную колонну приоритетом является отделение водоносных горизонтов и ингибирование глин [3]. Поэтому можно ввести в состав хлористый калий (KCl) в концентрации 3–5 % для подавления гидратации глинистых минералов монтмориллонитовой группы [4, 5], а также добавить полианионную целлюлозу (ПАЦ) низкой вязкости, чтобы контролировать водоотдачу и снизить риск прихватов инструмента [6].

Для вскрытия янтароносных горизонтов, которые залегают в палеогеновых песках, рекомендуется использовать буровые растворы с улучшенной выносящей способностью с смазывающими свойствами. Поэтому в растворы типа «Катбурр» имеет смысл ввести бентонит для увеличения пластической вязкости и соответственно

для улучшения транспорта шлама в затрубном пространстве при низкой скорости циркуляции [7]. Также рекомендуется использовать синтетические, но не нефтяные смазки для предотвращения прихватов инструмента и применять герметизаторы порового пространства для предупреждения проникновения фильтрата в пласт.

Стоит обратить внимание, что необходимо учитывать экологический статус региона, поэтому буровые растворы типа «Катбурр» должны быть модифицированы биоразлагаемыми реагентами. Однако в качестве базовой рецептуры необходимо использовать воду с минерализацией до 15 г/л для повышения ингибирующих способностей бурового раствора для избежания дополнительных химических затрат.

Геолого-технические особенности Калининградской области, обусловленные осадочным генезисом пород Балтийской синеклизы и влиянием четвертичного оледенения, требуют применения буровых растворов с высоким ингибирующим потенциалом и контролируемыми реологическими свойствами. Использование буровых растворов типа «Катбурр» с некоторыми модификациями обеспечит сохранение устойчивости ствола скважины, соблюдение экологических норм региона и повысит эффективность бурения.

Литература:

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации / М-во природ. ресурсов и экологии Рос. Федерации, Федер. агентство по недропользованию, Федер. гос. унитар. предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт имени А. П. Карпинского» (ФГУП «ВСЕГЕИ»). – Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). – Сер. Центр.-Европ. – Л. N 34. – СПб. : Картограф. ф-ка ВСЕГЕИ, 2011.
2. Курбанов, Х. Н. Поликатионные буровые растворы для строительства скважин в сложных горно-геологических условиях / Х. Н. Курбанов, Д. Р. Валеев // Ломоносов-2020 : материалы Междунар. науч. форума (секция «Разработка месторождений нефти и газа»), Москва, 2020 г. / Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М., 2020.
3. Минеев, А. В. Аварии и осложнения при бурении нефтяных и газовых скважин / А. В. Минеев, Е. Е. Милосердов, А. С. Мамышев // Наука и современность. – 2013. – № 22.
4. Самадов, А. Х. Применение ингибированный буровых смесей для поддержания прочности скважины / А. Х. Самадов, Э. С. Мирзаев // Экономика и социум. – 2021. № 4–2 (83).
5. Давлетбердина, И. Б. Ингибирующие буровые растворы / И. Б. Давлетбердина // Роль инноваций в трансформации современной науки. – 2016. – С. 52–54.
6. Лаврентиади, Ю. С. Повышение экологичности технологических жидкостей, применяемых для бурения скважин / Ю. С. Лаврентиади, Е. Л. Леушева // Недропользование. – 2023. – № 1.
7. Зайнуллина, А. Ш. Исследование реологических параметров бентонита в буровых растворах / А. Ш. Зайнуллина, Ф. Б. Сиденова // Вестник Алматинского технологического университета. – 2018. – №. 4. – С. 97–101.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СТАЦИОНАРНОГО РОБОТА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ ПОДВИЖНОСТИ

Д. В. Лацык

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Представлен анализ изучения рабочей зоны стационарного робота с шестью степенями подвижности.

Ключевые слова: рабочее пространство робота, графический метод решения, аналитический метод решения.

Данная задача может решаться двумя способами:

1. Графический метод решения. Рабочее пространство робота – это область пространства, в которой может находиться его рабочий орган (схват, инструмент) при функционировании всех степеней подвижности. Конфигурация и размеры рабочей зоны являются одними из ключевых характеристик при проектировании робототехнических комплексов, так как определяют возможность выполнения технологических операций и компоновку оборудования.

Рабочее пространство формируется на основе кинематической схемы робота, которая описывает взаимосвязь между сочленениями и звеньями. В данной работе рассматривается робот с кодовым обозначением ОСВААВС, где каждая буква соответствует определенному типу кинематической пары в порядке от основания к рабочему органу.

В робототехнике приняты следующие обозначения:

О – основание; *A*, *B*, *C* – повороты вокруг осей *X*, *Y*, *Z* соответственно.

Структура ОСВААС соответствует роботу с шестью степенями свободы, у которого все сочленения вращательные. Такая кинематика обеспечивает высокую гибкость и маневренность, позволяя рабочему органу достигать точек в пространстве под различными углами.

Для определения рабочего пространства робота с кинематической схемой ОСВААВС используется графический метод построения огибающих линий. Суть метода заключается в последовательном определении зон достижимости каждого звена относительно предыдущего с учетом всех степеней подвижности.

Построим структурную схему (рис. 1) в плоскостях *ZY*, *ZX* и *XY* с учетом конструктивных размеров.

Длины звеньев: $l_1 = 200$ мм, $l_2 = 300$ мм, $l_3 = 200$ мм,, $l_4 = 100$ мм, $l_5 = 50$ мм, $l_6 = 50$ мм, $l_7 = 50$ мм.

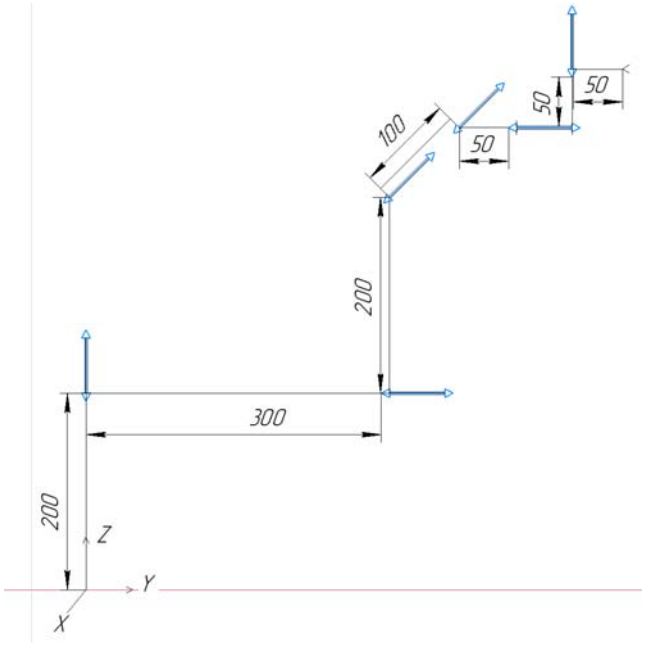


Рис. 1. Структурная схема робота

Вид сбоку (плоскость *ZY*) – определяется проекция рабочей зоны на фронтальную плоскость (рис. 2). Для этого из точек оси поворотных вокруг оси *X* звеньев проводится окружность радиусом, равным максимально дальнему положению манипулятора относительно этой точки.

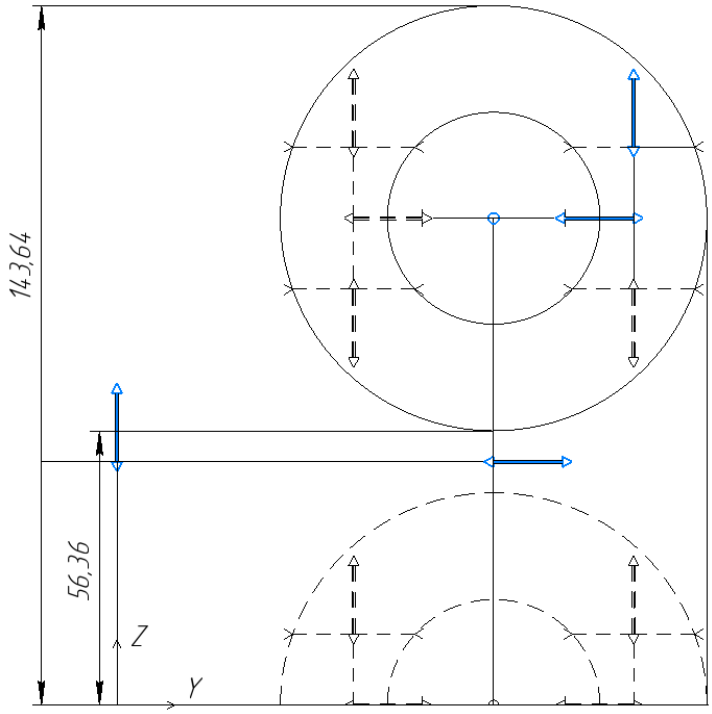


Рис. 2. Проекция схемы на *ZY*

Вид сверху (плоскость *XY*) – делается аналогично виду сбоку. Далее добавляем на этот вид рабочую зону с вида сбоку для отображения всей рабочей области (рис. 3).

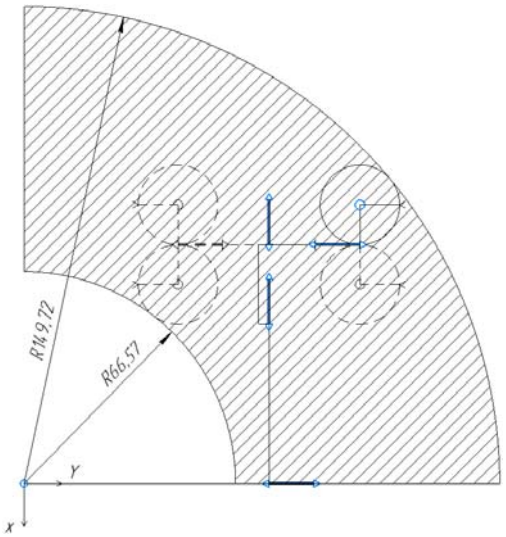


Рис. 3. Проекция рабочего пространства на *XY*

Для наглядности возьмем другой код.

По исходным данным имеется код робота: *OCAABAC*. По данному коду формируем структурную схему робота (рис. 4), учитывая размеры $l_1 = 200$ мм, $l_2 = 300$ мм, $l_3 = 200$ мм, $l_4 = 100$ мм, $l_5 = 50$ мм.

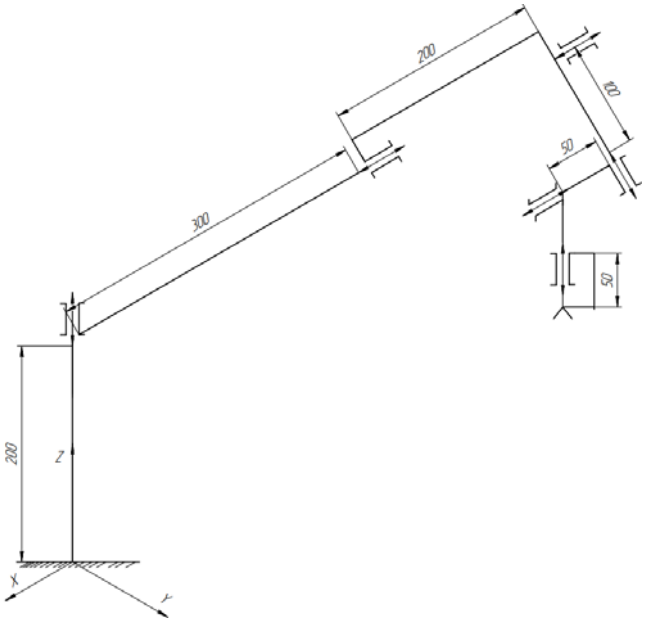


Рис. 4. Структурная схема робота

Таким образом, в зависимости от кода кинематических пар сам робот и его рабочая зона будут кардинально изменятся, также стоит отметить достоинства и недостатки графического метода, который позволяет определить рабочее пространство в целом, но не дает определить положение и расположение схвата руки робота в системе координат робота (рис. 5, 6).

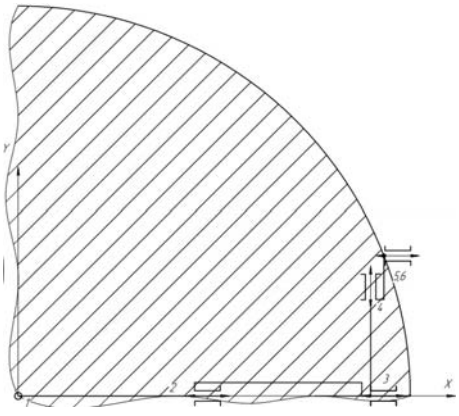


Рис. 5. Робот в плоскости *YX*

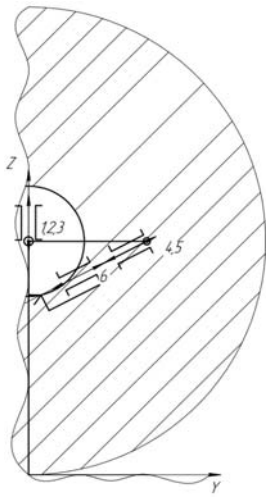


Рис. 6. Робот в плоскости *ZY*

Для того чтобы найти какое-то определенное положение руки, мы должны использовать второй метод:

2. Аналитический метод решения. Для решения этим методом нам нужно решить прямую задачу расчета положения и расположения системы схвата робота относительно системы самого робота, найти матрицу положений схвата робота.

Принимаем все управляемые координаты равными 30°:

$$[A]=[A_3(l_1)][A_6(\gamma)][A_2(l_2)][A_5(\beta)][A_3(l_3)][A_4(\alpha)][A_1(l_4)][A_4(\alpha)][A_2(l_5)]\times$$

$$\times[A_4(\beta)][A_3(l_6)][A_4(\gamma)].$$

Объединим матрицы по парам:

$$[A_{06}]=[A_{01}][A_{12}][A_{23}][A_{34}][A_{45}][A_{56}];$$

$$[A_{01}]=\begin{bmatrix}\cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0\\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & -l_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\quad [A_{12}]=\begin{bmatrix}\cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0\\ 0 & 1 & 0 & -l_2\\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix};$$

$$[A_{23}]=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0\\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & -l_3\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\quad [A_{34}]=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & -l_4\\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0\\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix};$$

$$[A_{45}]=\begin{bmatrix}\cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0\\ 0 & 1 & 0 & -l_5\\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\quad [A_{56}]=\begin{bmatrix}\cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0\\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & -l_6\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Найдем матрицу положений и расположений $[A_{06}]$ и, подставив в нее начальные данные, получим:

$$[A_{06}]=\begin{bmatrix}0{,}688 & 0{,}57 & 0{,}325 & -281{,}623\\ -0{,}325 & -0{,}354 & 0{,}938 & -143{,}914\\ 0{,}65 & -1{,}025 & 0{,}125 & -321{,}979\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

В заключение можно отметить, что данный метод, как говорилось ранее, хорош тем, что благодаря ему мы найдем положение и расположение схвата в системе координат робота.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК КОРПУСОВ РЕДУКТОРОВ

Р. О. Кирьянов

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Проведен сравнительный анализ семи методов изготовления заготовок корпусов редукторов: литье в ПГС, ХТС, кокиль, под давлением, по выплавляемым моделям, сварные и сварно-литые корпуса. Для каждого метода определены технические, экономические и производственные параметры. На основе полученных данных сформулированы рекомендации по выбору оптимального метода производства заготовок в зависимости от объема производства, требуемой точности и сложности геометрии корпуса редуктора.

Ключевые слова: корпус, редуктор, заготовка, литье, сварка, оснастка.

Литье является наиболее распространенным методом получения заготовок корпусов редукторов, особенно в серийном и массовом производстве, что обусловлено сложной пространственной формой, наличием внутренних полостей, бобышек и ребер жесткости. Существует несколько видов литья [7, с. 4–5].

Литье в песчано-глинистые смеси (ПГС) – традиционный метод, основанный на использовании разовых форм из песчано-глинистой смеси [2, с. 10]. Позволяет получать отливки любых размеров из любых сплавов. Формы могут изготавливаться вручную или на автоматических линиях. Метод имеет низкую точность и грубую поверхность, требует больших припусков на обработку и имеет высокий процент брака [1, с. 5–8].

Литье в холодно-твердеющие смеси (ХТС) – усовершенствованный метод, где используются синтетические смолы, отверждаемые газообразным катализатором. Формы не требуют нагрева. Метод обеспечивает более высокую точность и чистоту поверхности, чем ПГС, но требует более дорогих материалов и специального оборудования [5, с. 34–36].

Литье в кокиль (металлические формы) – расплав заливается в многократно используемую металлическую форму из чугуна или стали. Быстрое охлаждение дает плотную структуру и высокие механические свойства [2, с. 28]. Метод применяется в основном для цветных сплавов. Кокили дороги в изготовлении, но выдерживают тысячи циклов [6, с. 12-14].

Литье под давлением (ЛПД) – расплав под высоким давлением впрыскивается в стальную пресс-форму. Самый производительный метод, применяется только для цветных сплавов. Обеспечивает высокую точность, тонкие стенки и минимальную механическую обработку [5, с. 48–50]. Требует огромных затрат на оснастку и окупается только при массовом производстве.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) – для каждой отливки изготавливается разовая восковая или полимерная модель, покрываемая керамической оболочкой. После выплавления модели в форму заливается металл. Метод очень трудоемкий и дорогой, но дает наивысшую точность и чистоту поверхности [5, с. 52–54].

Сварные корпуса из проката – изготавливаются сборкой и сваркой элементов из листового или фасонного проката. Технология не требует литейной оснастки, позволяет быстро получить корпус любых размеров. Применяется в единичном и мел-

косерийном производстве. Требует высокой квалификации сварщиков и обязательной механической обработки ответственных поверхностей [6, с. 18–20].

Сварно-литые корпуса – комбинированный метод, где нагруженные элементы выполняются литьем, а стенки и ребра – из проката, после чего все сваривается в единую конструкцию. Метод применяется для крупногабаритных, тяжело-нагрженных или уникальных редукторов. Сочетает прочность литья в ответственных зонах и экономичность проката в остальных.

Параметры технико-экономического обоснования (составлена автором на основе данных [1], [2], [5])

Параметр	Литье в ПГС (песок)	Литье в ХТС	Литье в кокиль	Литье под давлением	Литье по выплавленным моделям (ЛВМ)	Сварной (прокат)	Сварно-литой
Стоимость оснастки, BYN	1 600–6 400	9 600–32 000	16000–64 000	64 000–320 000	32 000–96 000	640–3 200	9600–25 600
Срок изготовления оснастки	1–4 недели	3–6 недель	1–3 месяца	2–6 месяцев	1–3 месяца	1–3 дня	2–4 недели
Трудоемкость, чел.ч/т	10–30	20–40	30–50	5–15	100–200	50–100	40–70
Энергопотребление, кВт · ч/т	300–500	350–550	200–400	600–1000	800–1500	150–300	250–450
Коэффициент использования металла КИМ, %	40–60	60–75	70–85	85–95	85–95	50–70	65–80
Типичный брак, %	5–12	2–5	3–8	2–10	1–5	1–3	2–6
Точность, квалитет IT	14–16	12–14	11–13	10–12	10–12	14–16 (до обработки)	12–14
Шероховатость Ra, мкм	50–320	20–80	6,3–20	1,6–6,3	1.6–6.3	10–40	6.3–40
Припуски на обработку, мм	3–8	2–5	1,5–4	0,5–1,5	0,3–1,0	3–6	2–5
Минимальная толщина стенки, мм	3–5	3–4	2,5–5	0.8–1,5	0,5–2	4–6	3–5
Сложность геометрии	Высокая	Высокая	Средняя	Очень высокая	Максимальная	Ограничена	Высокая
Время на первую деталь	1–1,5 месяца	1,5–2 месяца	2–4 месяца	4–8 месяцев	3–5 месяцев	2–5 дней	1–1,5 месяца
Время цикла в серии	10–30 мин	15–40 мин	5–20 мин	0,5–5 мин	3–10 дней	4–8 ч	8–24 ч

Анализ основных экономических параметров (см. таблицу) показывает, что сварка требует минимальных вложений в оснастку, что делает ее наиболее целесообразным выбором для единичного и мелкосерийного производства [3, с. 6], тогда как литье под давлением, напротив, предполагает огромные инвестиции, которые окупаются только при массовом производстве [5, с. 49].

Если рассматривать качество поверхности и точность, то наивысшие показатели по этим критериям обеспечивают литье под давлением и литье по выплавляемым моделям, в то время как литье в песчано-глинистые формы дает самую грубую поверхность, требующую значительной механической обработки [1, с. 12–15].

Что касается технологических параметров, то наиболее тонкостенные и геометрически сложные корпуса можно получить методами литья под давлением и литья по выплавляемым моделям, тогда как сварка накладывает серьезные ограничения на геометрию изделия [6, с. 8]. Кроме того, наиболее эффективно материал используется именно при литье под давлением и литье по выплавляемым моделям, где до 95 % металла идет в дело, тогда как литье в песчано-глинистые формы дает наибольшие отходы – до 60 % металла уходит в стружку [2, с. 15].

Говоря о браке и сложности геометрии, следует отметить, что наиболее стабильное качество обеспечивают литье по выплавляемым моделям и литье в холодно-твердеющие смеси, тогда как наибольший риск брака, достигающий 12 %, характерен для литья в песчано-глинистые формы [5, с. 41].

Зависимость для определения сравнительного критерия технико-экономического обоснования:

$$k = \frac{\sum k_i p_i}{i},$$

где k_i – показатель значимости i-го параметра; p_i – параметр технико-экономического показателя [7, с. 8–9].

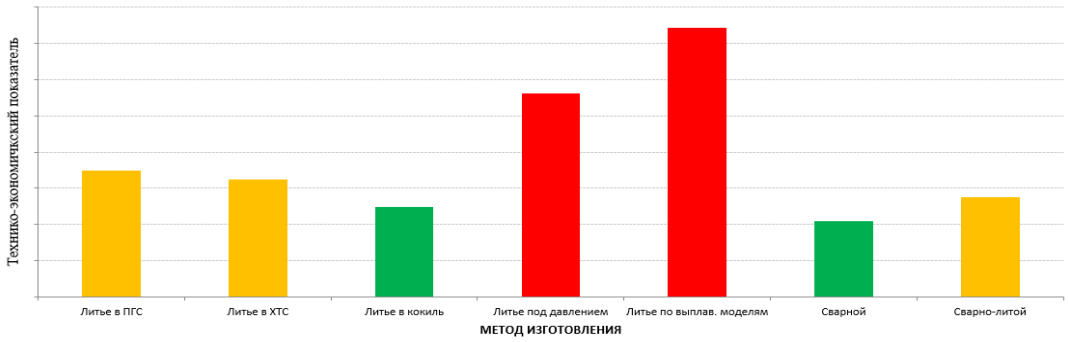


Рис. 1. Сравнение методов по средним значениям всех параметров

На основе анализа средних значений всех параметров (рис. 1) для семи методов изготовления корпусов редукторов можно сделать следующие выводы [3, с. 4].

Сварной корпус имеет самое низкое среднее значение, равное 41,3, что означает, что у него самые маленькие показатели по стоимости оснастки, трудоемкости, энергопотреблению и браку. Благодаря этому, он идеально подходит для единичного производства, однако заметно уступает другим методам по точности и сложности геометрии [6, с. 22].

Литье в кокиль со значением 50,9, сварно-литой метод с показателем 54,7, литье в холодно-твердеющие смеси, достигающее 64,7, и литье в песчано-глинистые формы с результатом 69,2 попадают в среднюю группу. Эти методы характеризуются умеренными затратами и приемлемым качеством, что делает их оптимальным выбором для серийного производства [2, с. 30–32].

Литье под давлением, среднее значение которого составляет 112,4, и литье по выплавляемым моделям с показателем 154,3 имеют самые высокие средние значения. Это самые дорогие и технологически сложные методы, однако именно они обеспечивают наилучшую точность, высокое качество поверхности и возможность получения деталей сложной геометрии [5, с. 55]. Их применение эффективно только в условиях массового производства.

Таким образом, прослеживается четкая закономерность: чем выше среднее значение, тем сложнее и дороже метод, но тем лучше качество и точность готового изделия. Окончательный выбор метода изготовления зависит от требуемого тиража и необходимых характеристик детали [1, с. 20].

Литература

1. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку : ГОСТ 26645-85. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 36 с.
2. Пиляева, О. В. Литейное производство: метод. указания к выполнению лаборатор.-практ. работ / О. В. Пиляева. – Красноярск : КрасГАУ, 2020. – 46 с.
3. Технология изготовления корпусных деталей (на примере корпуса редуктора): лекция № 9. – URL: https://studfile.net/preview/11273536/ (дата обращения: 16.04.2026).
4. Стасенко, Д. Л. Методика расчета героторного насоса с эпициклоидальным зацеплением / Д. Л. Стасенко, Д. В. Лаевский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2011. – № 4. – С. 27–33.
5. Бондарева, О. П. Технология конструкционных материалов. Основы литейного производства : учеб. пособие / О. П. Бондарева, Э. В. Седов, И. Л. Гоник. – Волгоград : ВолгГТУ, 2022. – 66 с.
6. Конструирование корпусов механических передач: лекция № 26. – URL: https://studfile.net/preview/12393191/ (дата обращения: 16.04.2026).
7. Якубович, Д. И. Технология материалов. Лабораторный практикум: Формообразование заготовок литьем / Д. И. Якубович, А. И. Хабибуллин, И. А. Лозиков. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 71 с.

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ГИДРОСИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ МАШИН С LS-УПРАВЛЕНИЕМ

Д. А. Клевжиц, Ю. А. Андреевец

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Проведен анализ схемотехнических решений гидросистем мобильных машин с LS-управлением, направленных на повышение энергоэффективности и надежности гидроприводов за счет адаптации параметров рабочей жидкости к нагрузке. Использование данного подхода позволяет оптимизировать работу гидросистемы, снизить энергетические потери и повысить точность управления исполнительными механизмами.

Ключевые слова: LS-управление, гидросистема, адаптация к нагрузке, энергоэффективность.

Для безопасной эксплуатации машины, повышения производительности, совмещения и точности выполняемых операций в гидросистемах мобильных машин применяется LS-управление. Load Sensing (LS – *чувствительность к нагрузке*) – способ управления гидросистем, при котором давление нагрузки используется как сигнал обратной связи для регулирования давления насоса [1]. Гидросистемы с адап-

тацией к нагрузке снижают потери мощности при управлении скоростью нескольких гидродвигателей. Для этого используются система выбора наибольшего давления и устройство, поддерживающее постоянную разность между ним и входным давлением. В качестве этого применяется либо насос с регулятором разности давлений (объемная адаптация), либо гидроклапан разности давлений (клапанная адаптация).

LS-управление в мобильных машинах можно осуществить следующими схемотехническими решениями:

1. Гидросистема рабочего оборудования с применением секционного распределителя с компенсаторами давления и гидравлической связью с регулятором насоса (рис. 1). Контур рабочего оборудования, бульдозера гусеничного AMKODOR DC201, предназначен для выполнения тяжелых землеройных работ на грунтах I–III категории без предварительного рыхления и на грунтах выше III категории с предварительным рыхлением [2]. Основными элементами гидросистемы рабочего оборудования являются: насос Н, распределитель Р, цилиндры Ц1–Ц5, блок быстрого опускания ББО, всасывающий Ф1 и сливной фильтры Ф3.

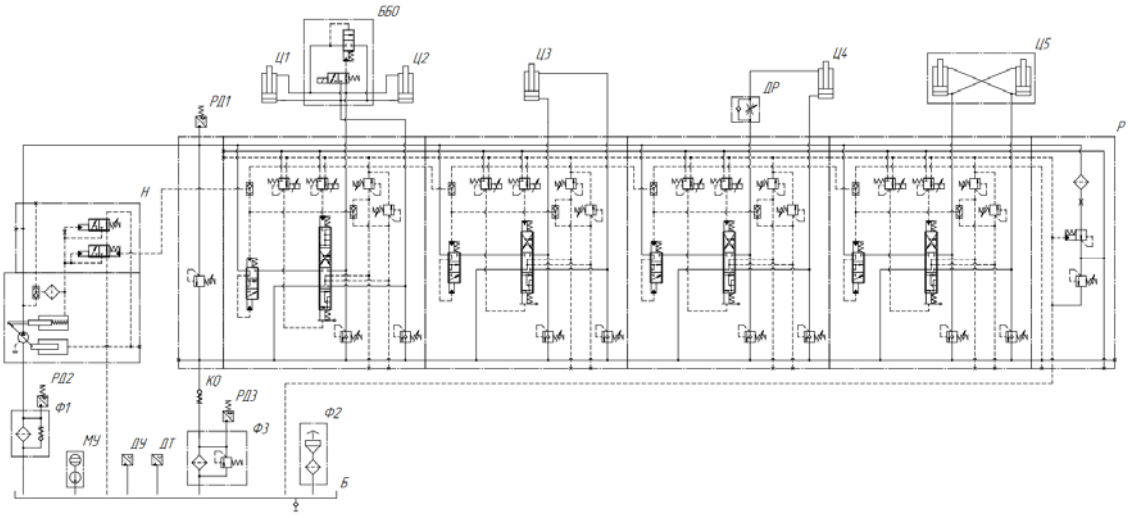
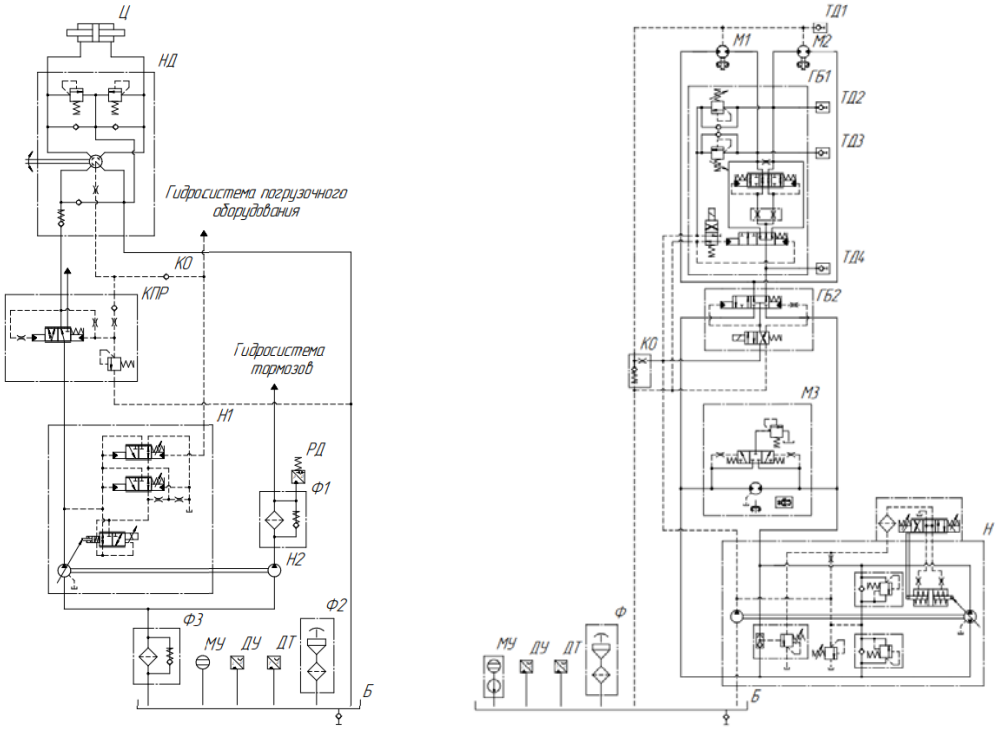


Рис. 1. Схема гидравлическая принципиальная

2. Гидросистема рулевого управления с применением насос-дозатора и гидравлической связью с регулятором основного насоса (рис. 2, *а*). Контур рулевого управления, экскаватора-погрузчика AMKODOR 732, предназначен для обеспечения маневренности и точности управления машиной при любых режимах работы [2]. Обеспечивает работу гидроцилиндра моста, снижая усилие на руле и позволяя оператору легко изменять направление движения. Гидросистема рулевого управления включает клапан приоритетный КПР, клапан обратный КО, тандем-насос Н1, Н2, насос-дозатор НД, всасывающий фильтр Ф3, напорный фильтр Ф1.

3. Гидросистема хода с применением гидроблока управления гидромоторов переднего М1, М2 и заднего М3 мостов и гидравлической связью с регулятором насоса (рис. 2, *б*). Контур хода, комбайна початкоуборочного ES6, предназначен для изменения скорости движения и изменения направления движения машины [3]. Гидросистема хода включает тандем-насос Н, объединенный гидроблок подключения управляемого моста ГБ и гидроблок блокировки управляемого моста ГБ2.



а) *б*)

Рис. 2. Схема гидравлическая принципиальная:
а – рулевого управления; *б* – хода

На основе анализа схемотехнических решений гидросистем мобильных машин с LS-управлением и требованиями заказчика разработана схема гидравлическая принципиальная погрузчика с телескопической стрелой, объединяющая контуры рабочего оборудования и рулевого управления с объемной и клапанной адаптацией к нагрузке (рис. 3).

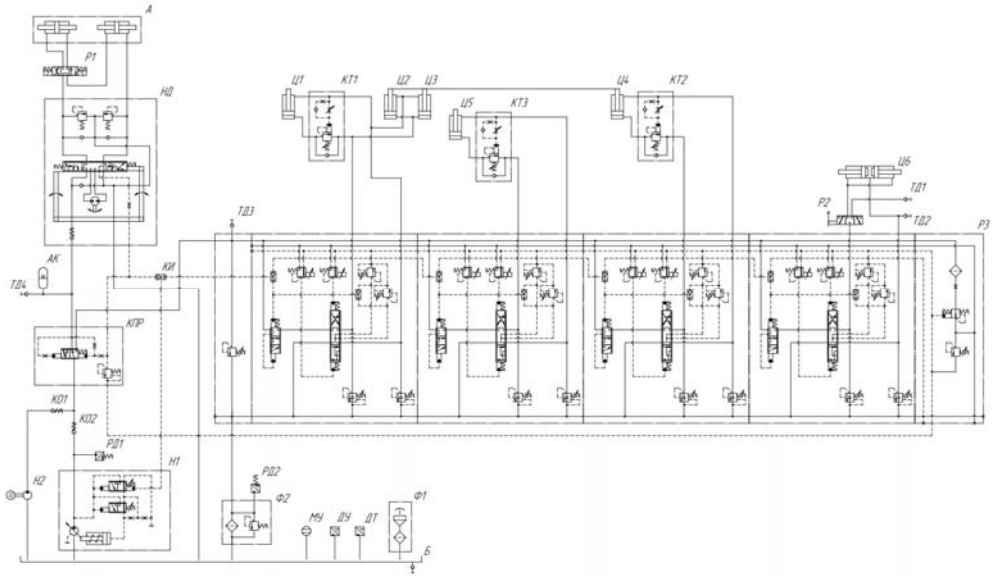


Рис. 3. Схема гидравлическая принципиальная

Гидросистема рабочего оборудования и рулевого управления выполнена с применением секционного распределителя с компенсаторами давления, насос-дозатором и гидравлической связью с регулятором насоса через клапан приоритетный и клапан ИЛИ. Контур рабочего оборудования служит для приведения в движение механизмов и рабочих органов погрузчика, и управления их движением при выполнении погрузочно-разгрузочных работ с различными видами материалов и грузов. Контур рулевого управления, с двумя ведущими мостами, предназначен для обеспечения маневренности и точности управления машиной при любых режимах работы: переднего управляемого моста (транспортный режим); переднего и заднего управляемых мостов (режим минимальный радиус поворота); поворота колес переднего и заднего управляемых мостов в одну сторону (режим «краб»).

Гидросистема погрузчика с LS-управлением обеспечивает согласование расхода рабочей жидкости с текущими нагрузками, вследствие чего при малой разнице давлений нагрузки на рабочих органах гидродвигателей достигаются минимальные потери мощности, связанные с теплоотдачей поверхностей гидропривода. Применение насоса Н с регулятором разности давлений с клапаном ИЛИ КИ обеспечивает поддержание требуемого перепада давления, передачу управляющего сигнала к регулятору и согласованную работу всех контуров системы. Использование секционного распределителя Р3 с компенсаторами давления и приоритетного клапана КПР обеспечивает стабильное распределение потоков на исполнительные механизмы и между контурами гидросистемы. Применение насос-дозатора НД способствует точности управления и повышению устойчивости отклика на управляющие воздействия.

Гидросистемы с LS-управлением характеризуются низкими потерями энергии, экономичностью и малым нагревов от дросселирования, что снижает окисление и увеличивает срок эксплуатации рабочей жидкости. По сравнению с обычными системами они гораздо менее требовательны к затратам энергии, а потери мощности зависит от перепада давления и подачи насоса, что повышает энергоэкономичность и срок эксплуатации гидросистемы.

Литература

1. Гинзбург, А. А. Дроссельное регулирование в гидросистемах и адаптация гидропривода к нагрузке (LS-принцип) : курс лекций для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» днев. и заоч. форм обучения / А. А. Гинзбург. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 77 с.
2. Каталог продукции ОАО «AMKODOR». – URL: https://amkodor.by/catalog/ (дата обращения: 24.03.2026).
3. Янкович, Д. М. Анализ схемотехнических решений автоматического переключения частоты вращения гидромоторов ходовой части комбайна / Д. М. Янкович, Ю. А. Андреевец ; науч. рук. Д. Л. Стасенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2025 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2025. – Ч. 1. – С. 49–52.

ИЗУЧЕНИЕ ВИДОВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В ГИДРОСИСТЕМАХ

П. А. Тарун

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

Произведен анализ основных видов структурного резервирования, применяемых в гидравлических системах для повышения их надежности. Рассмотрены принципы работы

горячего, холодного резерва и резервирования замещением. Выполнен сравнительный анализ эффективности общего и раздельного резервирования, определены условия их рационального применения. Представлены типовые схемы дублирования элементов гидропривода.

Ключевые слова: гидросистема, надежность, резервирование, дублирование, отказ, вероятность безотказной работы.

Резервирование в гидросистемах представляет собой метод повышения надежности путем введения в систему дополнительных элементов, предназначенных для выполнения рабочих функций вместо отказавших основных. Этот подход является одним из наиболее эффективных способов обеспечения бесперебойной работы гидравлического оборудования в условиях интенсивной эксплуатации. Необходимость применения резервирования обусловлена тем, что отказ даже одного элемента, например, насоса или распределителя, может привести к полной остановке машины, созданию аварийной ситуации или значительным экономическим потерям. Резервирование позволяет системе продолжать функционировать при выходе из строя одного или нескольких элементов за счет использования дублирующих устройств.

В зависимости от требований к надежности и условий эксплуатации могут применяться различные виды резервирования, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и ограничения [1, 2].

Горячее резервирование, также называемое активным, является одним из наиболее распространенных способов повышения надежности гидравлических систем. Принцип его работы заключается в том, что оба насоса подключены к общему напорному коллектору и работают одновременно (рис. 1). В штатном режиме основной насос обеспечивает требуемое рабочее давление, а резервный насос также находится в работе, создавая некоторый дополнительный расход или находясь в режиме готовности. Если давление в системе падает из-за поломки основного насоса, резервный насос, который уже запущен, автоматически берет на себя всю нагрузку. Обратный клапан, установленный за основным насосом, закрывается, предотвращая перетекание рабочей жидкости через неисправный насос. Система продолжает функционировать без какого-либо перерыва в подаче давления.

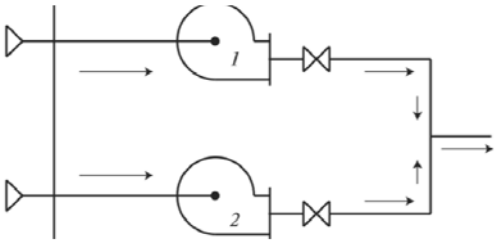


Рис. 1. Горячее (активное) резервирование

Основным преимуществом горячего резервирования является мгновенное замещение отказавшего элемента, что особенно важно для систем, где недопустима даже кратковременная остановка, например, в рулевых приводах самолетов или тормозных системах. Однако у этого метода есть и недостаток: ресурс обоих насосов тратится одинаково, так как износ идет постоянно, даже при работе системы в штатном режиме. Тем не менее для важных систем этот недостаток часто считают приемлемой платой за максимальную надежность.

Холодное резервирование, или ненагруженный резерв, предполагает работу только основного насоса, тогда как резервный насос находится в выключенном состоянии и не потребляет ресурс (рис. 2). В нормальном режиме функционирует только основной насос, обеспечивая питание гидросистемы. Датчик давления, установленный на напорной линии, непрерывно контролирует уровень давления. Если давление падает ниже допустимого уровня, что свидетельствует о неисправности основного насоса, датчик подает команду на блок управления, который запускает резервный двигатель, и резервный насос включается в работу.

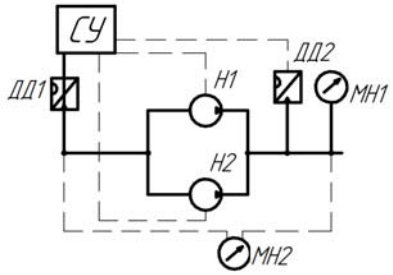


Рис. 2. Холодное (ненагруженное) резервирование

После выхода резервного насоса на рабочий режим система продолжает функционировать. Основными преимуществами холодного резервирования являются: резервный насос остается новым и неизношенным до момента своей активации; достигается экономия энергии, так как резервный насос не работает постоянно. Однако имеется и существенный недостаток – наличие паузы на запуск резерва. Время этой паузы может составлять от долей секунды до нескольких секунд в зависимости от инерционности системы запуска и типа привода. Для многих гидросистем такая пауза допустима, но для ответственных агрегатов, где требуется мгновенное замещение, холодный резерв не подходит.

Постоянное резервирование в гидросистемах представляет собой метод повышения надежности, при котором резервные элементы работают постоянно параллельно с основным, без какого-либо переключения (рис. 3).

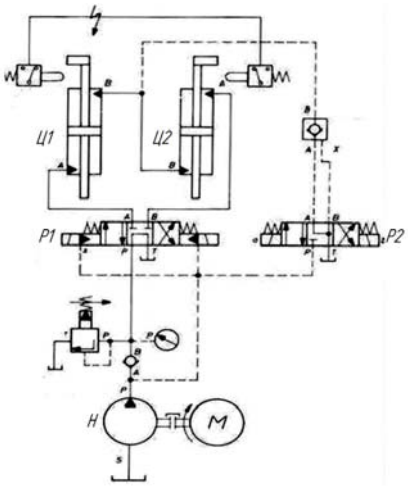


Рис. 3. Постоянное резервирование

К таким элементам могут относиться насосы, клапаны, фильтры и другие устройства. Резерв включен всегда, поэтому при поломке основного элемента перерыв в работе полностью отсутствует, и не требуются специальные переключающие устройства. В отличие от горячего резервирования, где резервный насос может работать в облегченном режиме, при постоянном резервировании все элементы несут одинаковую нагрузку. Это дает нам отсутствие перерывов в работе при отказе элемента, что особенно ценно для систем непрерывного действия. Постоянное резервирование часто применяется в тех случаях, когда остановка системы для переключения на резерв невозможна по технологическим или соображениям безопасности.

Особое место среди способов повышения надежности занимает резервирование замещением. Этот метод позволяет автоматически переключаться с основного насоса на резервный без применения электроники, датчиков и сложных систем управления. В основе этого способа использование гидравлический клапан «ИЛИ» (рис. 4), который автоматически подключает ту линию, где есть давление. Когда работает основной насос и создает давление, шарик под действием потока жидкости перекрывает вход от резервного насоса, не позволяя жидкости циркулировать через неработающий насос. Если основной насос по каким-либо причинам выходит из строя и давление в его линии падает, запорный элемент под действием давления от резервного насоса открывает путь рабочей жидкости от резервного насоса к потребителю. Таким образом, резервный насос подключается автоматически, причем переключение происходит исключительно за счет гидравлической энергии, без участия электрических сигналов, реле или контроллеров. Главным преимуществом резервирования замещением является то, что не нужна электроника и датчики, а срабатывание происходит чисто за счет гидравлики. Это делает систему более надежной, так как исключает возможные отказы электронных компонентов. Кроме того, такое решение проще в эксплуатации и дешевле в реализации.

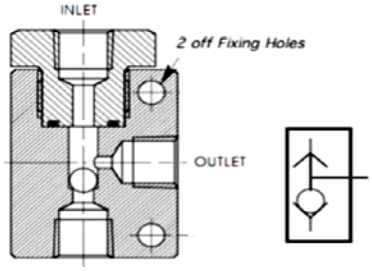


Рис. 4. Резервирование замещением

Таким образом, выбор вида резервирования в гидросистемах определяется требованиями к надежности, условиями эксплуатации и экономической целесообразностью.

Горячее резервирование целесообразно применять в системах, не допускающих даже кратковременного перерыва в работе, например, в системах управления самолетов или аварийных тормозных системах. Холодный резерв предпочтителен для систем с ограниченным ресурсом насосного оборудования или там, где допустима небольшая пауза на запуск резерва, например, в резервных гидросистемах промышленных установок. Постоянное резервирование обеспечивает мгновенную готовность и отсутствие перерыва, но ведет к равномерному износу всех элементов, поэтому его применяют для фильтров, клапанов и других элементов, где износ не является критическим фак-

тором. Резервирование замещением позволяет создавать высоконадежные системы без усложнения электронной части управления, что особенно ценно для машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. Дальнейшее развитие методов резервирования связано с интеграцией цифровых систем управления и диагностики, позволяющих осуществлять прогнозирование отказов и динамическую реконфигурацию структуры гидросистемы в реальном времени.

Литература

1. Надежность гидравлических систем воздушных судов / Т. М. Башта, В. Д. Бабанская, Ю. С. Головко [и др.]. – М. : Транспорт. 1986. – 279 с.
2. Проектирование гидравлических систем машин : учеб. пособие / Г. М. Иванов, С. А. Ермаков, Б. Л. Коробочкин, Р. М. Пасынков. – М. : Машиностроение, 1992. – 224 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ НАЛАДКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

М. В. Матвеенцева

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Рассмотрена задача оптимизации периода стойкости инструментальной наладки при обработке корпусных деталей на станках с ЧПУ. Исследованы зависимости стойкости режущего инструмента от режимов резания и материалов. Для прогнозирования стойкости использована формула Тейлора, позволяющая определить эмпирический коэффициент C_v и рассчитать расчетную стойкость инструмента. На основе экспериментальных данных установлены средние значения C_v, а также построены графики зависимостей. Результаты работы способствуют снижению затрат на инструментальное хозяйство и повышению производительности механической обработки.

Ключевые слова: стойкость инструмента, станки с ЧПУ, формула Тейлора, режимы резания, корпусные детали.

Стойкость режущего инструмента играет ключевую роль в эффективности и экономичности механической обработки. Оптимизация режимов резания и подбор материалов инструмента и заготовки позволяют снизить затраты на инструментальное хозяйство, увеличить межремонтные периоды и повысить производительность. В качестве обрабатываемой детали используется типовая корпусная деталь из СЧ20 (рис. 1), обрабатываемая торцевой фрезой ASX400-100B07R со вставными твердосплавными (VO15TF) пластинами и метчиком М12-7Н (Р6М5).

Формула Тейлора, используемая для прогнозирования стойкости инструмента, имеет вид:

$$C_v = V^m S^y t^z T, \quad (1)$$

где T – стойкость инструмента, мин; V – скорость резания, м/мин; S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм; C_v – эмпирический коэффициент, зависящий от материала инструмента, обрабатываемого материала, геометрии инструмента и других факторов; m, y, z – показатели степени, характеризующие влияние скорости резания, подачи и глубины резания на стойкость инструмента.

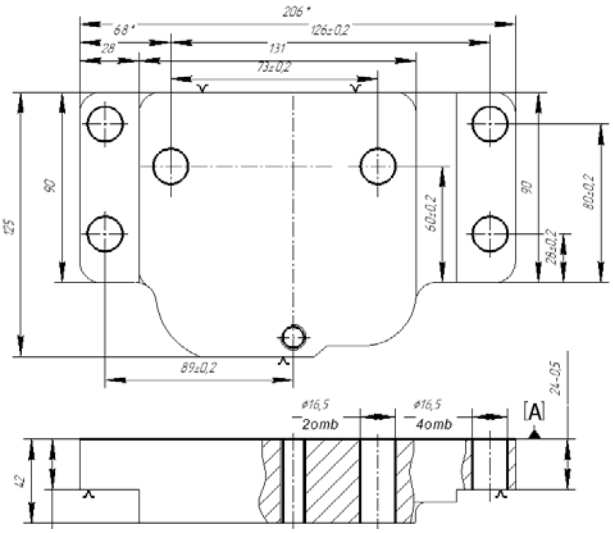


Рис. 1. Обрабатываемая деталь

Для корректного применения формулы необходимо определить значения коэффициентов *m, y, z* и C_v. В справочной литературе приводятся рекомендуемые значения этих коэффициентов. Для фрезы принимаем значения $m = 0{,}3$, $y = 0{,}3$, $z = 0{,}2$, для метчика – $m = 0{,}35$, $y = 0{,}6$, $z = 0{,}2$ [1].

Коэффициент C_v является ключевым параметром, так как он учитывает комплексное влияние материала инструмента и заготовки, геометрию режущей части, условия обработки (например, наличие охлаждающей жидкости) и другие факторы. В справочниках он часто приводится для стандартных условий обработки, но его значение может корректироваться в зависимости от конкретных условий [1]. Для определения коэффициента C_v используем формулу (1).

Далее, после нахождения C_v для каждого эксперимента, рассчитываем расчетную стойкость инструмента, что позволит оценить точность прогноза. В табл. 1 представлены экспериментальные данные и результаты расчетов для фрезы, а в табл. 2 – для метчика.

Таблица 1

Экспериментальные данные и результаты расчетов для фрезы

Скорость резания *V*, м/мин	**Подача *S*, мм/об**	**Глубина резания *t*, мм**	**Стойкость *T*, мин**	**C_v расчетное**	**Расчетная стойкость *T*, мин**
170	0,22	1,5	210,5	676,6	211,4
175	0,24	1,5	205,8	684,9	204,2
180	0,25	1,5	200	679,5	200
185	0,26	1,5	195,3	676,9	196
190	0,28	1,5	190,2	679,5	190,2

Таблица 2

Экспериментальные данные и результаты расчетов для метчика

Скорость резания *V*, м/мин	Подача *S*, мм/об	Глубина резания *t*, мм	Стойкость *T*, мин	C_v расчетное	Расчетная стойкость *T*, мин
14	1,75	40	65,5	482,6	61,8
14,5	1,75	40	62,7	467,7	61
15	1,75	40	60	452,9	60,3
15,5	1,75	40	58,4	445,9	59,6
16	1,75	40	55,2	426,2	58,9

Исходя из полученных данных, среднее значение коэффициента C_v фрезы – 697,5, а для метчика – 455,1.

Построим графики зависимостей $T_э = f(v)$ и $T_р = f(v)$, $T_р = f(v,s)$ для инструментов (рис. 2, 3).

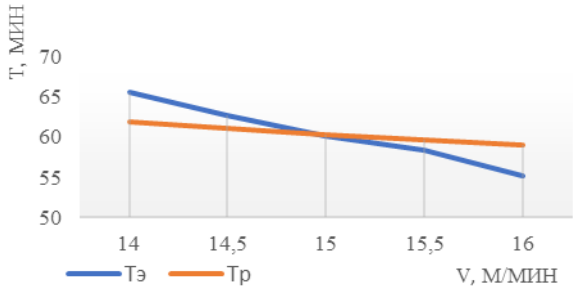
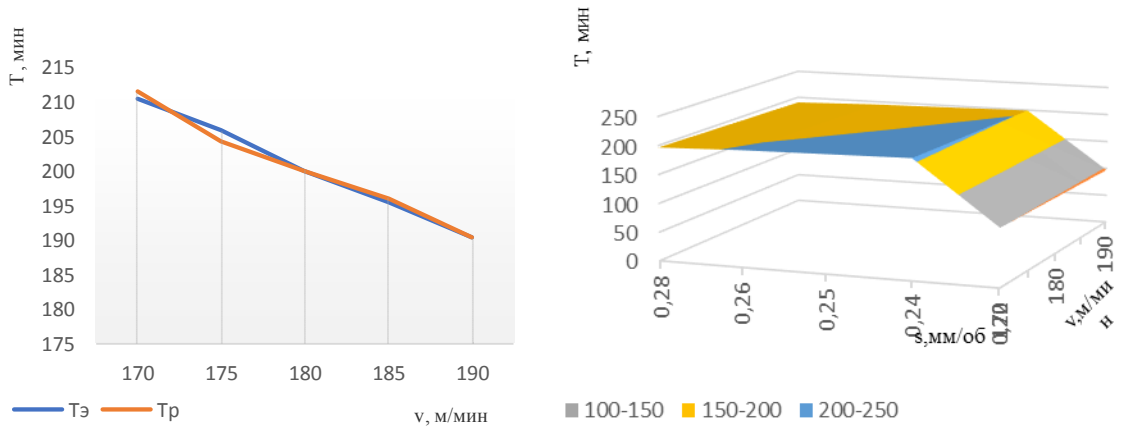


Рис. 2. Графики для метчика:
$T_э = f(v)$; $T_р = f(v)$



а) *б*)

Рис. 3. Графики для фрезы:
а – $T_э = f(v)$ и $T_р = f(v)$; *б* – $T_р = f(v, s)$

Из графиков рис. 2, 3 наглядно видим, что с увеличением скорости резания стойкость фрезы снижается, и с увеличением скорости резания стойкость метчика также снижается, но с меньшей интенсивностью.

Для оптимизации требуется выбор оптимальных параметров режимов резания, которые обеспечивают минимальную себестоимость единицы продукции или максимальную производительность. Подход минимизации себестоимости учитывает не только время обработки, но и стоимость инструмента, его стойкость, затраты на наладку и переточку. При максимизации производительности основной целью является сокращение времени обработки, что достигается за счет увеличения скорости резания и подачи, но с учетом ограничений по стойкости инструмента и качеству поверхности. Часто применяют критерии, сочетающие в себе оба подхода, например, достижение минимальной себестоимости при соблюдении заданного уровня производительности.

Для определения оптимальных параметров режимов резания потребуются исходные данные по операциям (параметры инструмента, параметры самой обработки). Выбираются параметры для оптимизации и определяются ограничения. Они могут быть приняты, например, такие как ограничение на режущие возможности инструмента, по мощности электродвигателя привода оборудования, по заданной производительности оборудования, по допустимым скоростным диапазонам, по обеспечению прочности крепления инструмента и т. п. Далее требуется выполнить линеаризацию всех условий (неравенств) путем их логарифмирования. По результатам расчетов следует построить геометрическую модель оптимизации и по ней определить подходящие параметры [3].

В рамках данной работы было продемонстрировано, как формула Тейлора может быть эффективно использована для прогнозирования стойкости режущего инструмента при обработке корпусных деталей на станках с ЧПУ. Были эмпирически определены ключевые коэффициенты для инструментов, что позволило предсказывать их ресурс. Этот подход открывает дорогу к более обоснованному выбору режимов резания, что, в свою очередь, ведет к ощутимому сокращению затрат на инструментальное хозяйство и росту производительности.

Литература

1. Смирнов, В. О. Теория резания металлов : учеб. для вузов / В. О. Смирнов, А. П. Грановский. – М. : Высш. шк., 2018. – 384 с.
2. Марков, А. И. Теория и практика оптимизации режимов резания / А. И. Марков. – М. : Машиностроение, 2010. – 288 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВМЯТИЮ ЛЕЗВИЯ НОЖА ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО АППАРАТА БАРАБАННОГО ТИПА

К. В. Ридкина

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

Научный руководитель П. Е. Родзевич

Рассмотрено теоретическое определение силы сопротивления вмятию лезвия ножа измельчающего аппарата барабанного типа в растительную массу в зависимости от величины сжатого перед резанием слоя массы.

Ключевые слова: сила сопротивления вмятию, лезвие ножа, измельчающий аппарат, критическая сила резания, растительная масса, слой растительной массы.

При резании однородных, упруговязких растительных материалов всегда имеет место предварительное сжатие их лезвием, а критическая сила $F_{кр}$, при которой завершается процесс сжатия растительного материала и начинается его резание, является максимальным из всех усилий, возникающих в процессе резания (рис. 1).

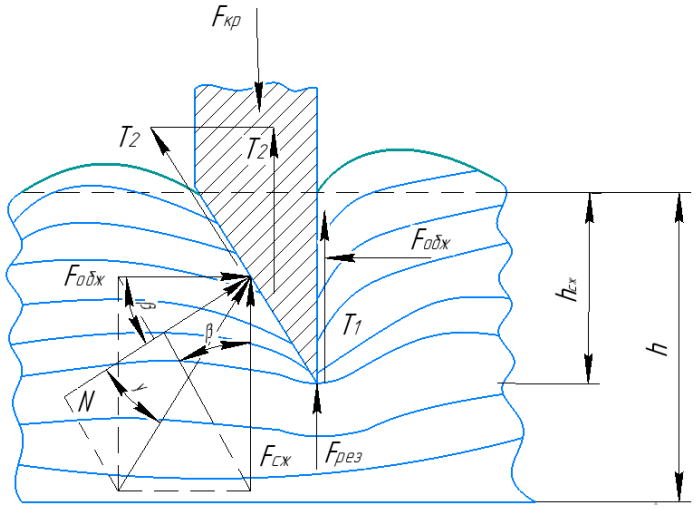


Рис. 1. Схема силового сопротивления внедрения лезвия ножа в растительную массу

Критическую силу можно представить выражением [1]:

$$F_{кр} = F_{рез} + F_{вред},$$

где $F_{рез}$ – сила резания растительной массы; $F_{вред}$ – сила сопротивления.

Силу $F_{рез}$ можно определить как произведение площади заточенной кромки лезвия $A_л$ на разрушающее напряжение $\sigma_р$:

$$F_{рез} = A_л \sigma_р = \delta l \sigma_р,$$

где δ – толщина кромки лезвия; l – длина лезвия.

Сила сопротивления $F_{вред}$ представляет собой силу вредных сопротивлений, связанных с деформацией перерезаемого слоя и трения фасок лезвия ножа длиной l при внедрении его в слой растительной массы. Силу сопротивления согласно [1] можно записать в виде

$$F_{вред} = \frac{E}{2}\frac{h_{сж}^2}{h}\left[\mathrm{tg}\beta + f\sin^2\beta + \mu\left(f + \cos^2\beta\right)\right]l,$$

где E – модуль продольной упругости первого рода; $h_{сж}$ – величина слоя растительной массы, сжатой лезвием перед началом резания; h – высота слоя растительной массы перед деформированием лезвием; β – угол заточки лезвия ножа; μ – коэффициент Пуассона; f – коэффициент трения материала о лезвие ножа.

Проведены расчеты по определению силы сопротивления вмятию лезвия ножа длиной $l = 1$ м, при угле заточки $\beta = 30°$, в зависимости от изменения величины сжатого слоя $h_{сж}$ от 5 до 20 мм при различной высоте h слоя растительной массы (100, 125, 150 мм). Модуль упругости принимается равным $E = 36{,}3 \cdot 10^6$ Па; коэффициент трения (динамический) $f = 0{,}47$; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}071$ [1]. Результаты расчетов представлены в таблице.

Результаты расчетов силы сопротивления вмятию

Величина сжатого слоя $h_{сж}$, м	**Сила сопротивления вмятию, Н**		
	h = 100 мм	**h = 125 мм**	**h = 150 мм**
0,005	3546	2837	2364
0,010	14180	11350	9456
0,015	31910	25530	21280
0,020	56730	45390	37820

Из таблицы результатов расчета видно, что сила сопротивления вмятию зависит от величины слоя растительной массы, подвергающейся предварительному сжатию. Так, для высоты слоя массы $h = 100$ мм сила сопротивления изменяется от 3546 Н для величины $h_{сж} = 5$ мм до 56730 Н при $h = 20$ мм, для высоты слоя $h = 125$ мм сила сопротивления изменяется от 2837 до 45390 Н, а при высоте слоя растительной массы $h = 150$ мм сила сопротивления изменяется от 2364 до 37820 Н.

На рис. 2 представлен график изменения силы сопротивления вмятию лезвия ножа при резании растительной массы от величины $h_{сж}$ предварительно сжатого слоя при различной высоте слоя h.

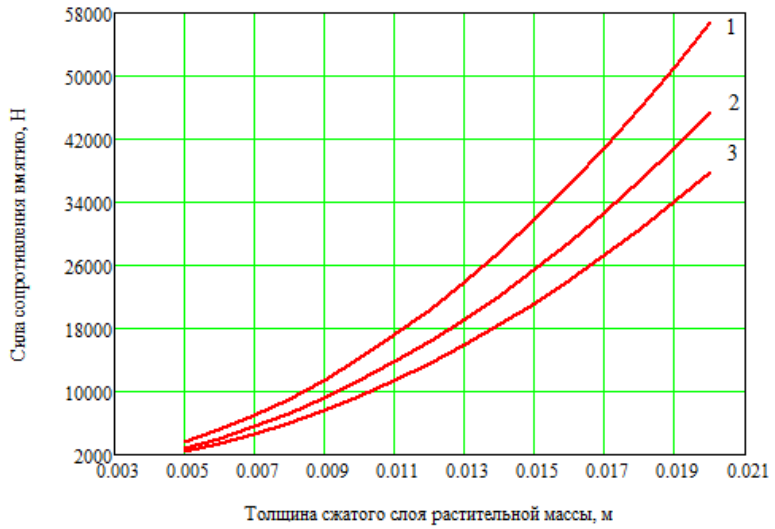


Рис. 2. График изменения силы сопротивления вмятию лезвия ножа при различной толщине сжатого слоя:
1 – высота слоя h = 100 мм; *2* – высота слоя h = 125 мм;
3 – высота слоя h = 150 мм

Таким образом, можно сказать, что сила сопротивления вмятию лезвия ножа в растительную массу значительно увеличивается при повышении толщины $h_{сж}$ сжимаемого перед резанием слоя массы. Сжатие растительной массы и подача ее к измельчающему барабану обеспечивается работой вальцов питающего аппарата. Если растительный материал недостаточно сжат, наблюдается значительное увеличение силы сопротивления вмятию лезвия, что приводит к повышению затрат энергии на весь процесс измельчения растительной массы. Поэтому необходимо стремиться к уменьшению величины $h_{сж}$ сжимаемого слоя, поступающего из питающего аппарата кормоуборочного комбайна, за счет более интенсивного сжатия растительной массы вальцами питающего аппарата.

Литература

1. Резник, Н. Е. Кормоуборочные комбайны / Н. Е. Резник. – М. : Машиностроение, 1980. – 375 с.
2. Влияние углов установки на напряженно-деформированное состояние ножа измельчающего барабана кормоуборочного комбайна / П. Е. Родзевич, В. В. Миренков, В. Ф. Хиженок, Е. П. Шельманова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2016. – № 1. – С. 31–37.
3. Родзевич, П. Е. Влияние сжатого слоя растительной массы на критическую силу резания // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «Компания» «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2020. – С. 60–63.

АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ И ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКЦИИ СТАЦИОНАРНОГО РОБОТА

А. А. Закревский

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Выполнен анализ собственных колебаний стационарного робота. Установлены формы модальных колебаний и распределение относительных амплитуд колебаний

Ключевые слова: роботы стационарные, виброустойчивость, жесткость, собственные колебания.

Точность позиционирования промышленных роботов напрямую зависит от их конструктивной жесткости. В условиях современных производств, требующих микронной точности, деформации несущего каркаса под нагрузкой могут приводить к браку продукции. Оценка и оптимизация жесткостных характеристик на этапе проектирования является критически важной задачей.

Цель работы – провести конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) модели стационарного робота и определить собственные частоты конструкции для обеспечения виброустойчивости.

Анализ полученных результатов. В качестве объекта исследования выступает 3D-модель манипуляционной системы. Для снижения инерционности и материалоемкости в конструкцию были внесены изменения: введены полые стенки и технологические вырезы в ненагруженных сечениях.

Для проведения инженерного анализа использовался программный модуль APM FEM. Модель была приведена в «максимально напряженное положение» (максимальный вылет руки), что создает наибольшие изгибающие моменты в сочленениях. Граничные условия включали жесткое закрепление основания (имитация монтажа на фундамент) и приложение расчетной нагрузки к фланцу исполнительного органа.

Исследование НДС и модальный анализ. В ходе выполнения расчетов были получены следующие данные:

• Распределение напряжений: максимальные эквивалентные напряжения локализованы в узлах крепления стойки к основанию. Коэффициент запаса прочности по текучести материала составил 3,2, что подтверждает надежность конструкции.

• Деформации: максимальное суммарное перемещение крайней точки манипулятора зафиксировано на уровне 0,057 мм. Данный показатель удовлетворяет требованиям прецизионной обработки.

Особое внимание уделено модальному анализу. Для исключения резонанса при работе сервоприводов определены собственные частоты. Первая частота составила 136,57 Гц. Учитывая, что рабочие частоты большинства промышленных приводов лежат в диапазоне до 50–100 Гц, спроектированная конструкция обладает достаточным запасом виброустойчивости.

Распределение напряжений в конструкции при максимальном вылете показано на рис. 1.

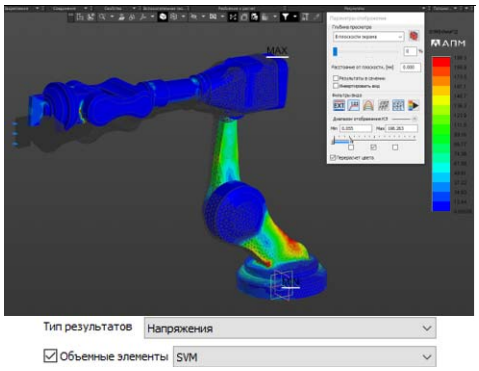


Рис. 1. Распределение напряжений в конструкции при максимальном вылете

Визуализация суммарных деформаций (перемещений) элементов каркаса представлена на рис. 2.

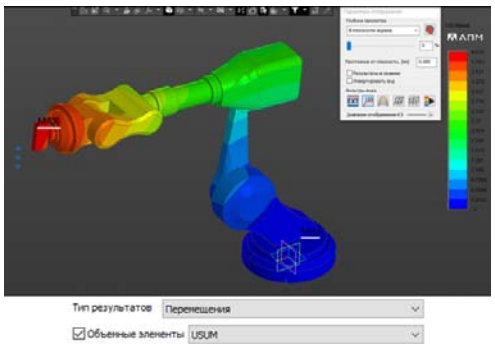


Рис. 2. Визуализация суммарных деформаций (перемещений) элементов каркаса

В заключение отметим, что проведенный анализ в среде APM FEM показал: модифицированная конструкция робота (с полыми элементами) сохраняет необходимую жесткость при снижении общей массы. Полученная первая собственная частота 136.57 Гц гарантирует отсутствие резонансных колебаний в штатных режимах эксплуатации. Методика позволяет оптимизировать металлоконструкции роботов еще до этапа изготовления прототипа.

Выражаю благодарность моему научному руководителю доктору технических наук, профессору М. И. Михайлову за консультации в области конечно-элементного моделирования.

Литература

1. Шелофаст, В. В. Основы проектирования машин / В. В. Шелофаст. – М. : АПМ, 2005. – 472 с.
2. Алямовский, А. А. Инженерный анализ в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2015.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ ПОРОШКОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

М. В. Невзоров

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

Научный руководитель Г. В. Петришин

Показано, что устойчивая переработка металлических отходов металлургического производства позволяет использовать частицы отходов в качестве порошкового сырья для дополнительного производства самофлюсующихся порошков. Установлено, что термическое нанесение покрытия на изношенные поверхности металлических деталей обеспечивает их защиту и улучшает функциональные свойства.

Ключевые слова: переработка, самофлюсующиеся порошки, покрытия.

Эффективное управление отходами играет ключевую роль в достижении целей устойчивого развития (ЦУР), сформулированных Организацией Объединенных Наций. Среди них в ЦУР 12 «Обеспечение устойчивых моделей потребления и производства подчеркивается важность ответственного обращения с отходами и ресурсоэффективности» [1]. Несмотря на предпринимаемые усилия, на пути к достижению устойчивого развития по-прежнему существует ряд проблем, в частности, связанных с минимизацией воздействия на окружающую среду и максимальным восстановлением ресурсов. Одним из ключевых препятствий является сложность процесса стабилизации, и поэтому – обезвреживание промышленных отходов, что еще больше усложняет процессы переработки. В этом контексте твердые отходы в виде частиц порошка, образующиеся в ходе различных передовых производственных процессов, таких как производство присадок на основе порошков, нанесение покрытий, представляют собой серьезную проблему при их удалении и вторичной переработке [2].

Поэтому необходимо разрабатывать практичную и комплексную стратегию «от отходов к покрытию», которая преобразует разнородные металлические отходы в высокоэффективные покрытия для восстановления изношенных поверхностей деталей узлов трения методом термического напыления, например, лазерной наплавки.

Материалы и методология выполнения работы. Для восстановления поверхностей деталей путем лазерной наплавки использовались самофлюсующиеся порошки на основе железа Fe, полученные из отходов металлообработки (стружка, окалина, шлам). Они представляют собой экономически эффективную и экологичную альтернативу дорогим никелевым порошкам, которые широко используются для восстановления деталей и повышения их износостойкости методами газотермического напыления и наплавки. В качестве сырья использовались промышленные отходы, содержащие железо и легирующие элементы: стружка легированных сталей (хромистых Н70Х18СР4, стали 40Х), отходы горячей прокатки низкоуглеродистых сталей, чугунная колотая дробь (ДЧК).

Технология получения порошков. Превращение отходов в высококачественный наплавочный материал включает несколько этапов: измельчение, подготовка шихты, легирование, распыление. В этом исследовании два типа исходных материалов были переработаны из промышленных побочных продуктов, которые обычно считаются отходами. Частицы стружки, собранные в качестве отходов в процессе измельчения, подвергали механическому измельчению в течение 30 мин при 300 об. в минуту для уменьшения размера частиц. Затем измельченную стружку просеивали с помощью вибросита для отделения частиц размером менее 53 мкм, оптимизируя морфологию и распределение по размерам, что необходимо для успешного нанесения методом термического распыления. Для обеспечения безопасности и сыпучести полученные порошки и просеянное сырье затем сушили при температуре 100 °C в течение 30 мин для удаления остаточной влаги.

Типичный состав таких порошков включает основу из железа (Fe) с добавлением активного компонента бора B, который снижает температуру плавления и образует шлак (флюс), защищающий металл от окисления и повышающий смачиваемость поверхности.

Изготовленные порошковые композиции из исходного сырья были проанализированы на морфологию частиц, состав и распределение по размерам, чтобы оценить их пригодность для повторного использования при лазерной наплавке. Перед нанесением на подложку из стали Ст40 ГОСТ 1050-88 в состоянии поставки, порошки сушили и просеивали, чтобы устранить возможные загрязнения и обеспечить равномерное распределение частиц по размеру. Кроме того, все порошки подвергались механическому смешиванию перед распылением, чтобы обеспечить равномерное распределение по всему нанесенному слою. Распределение частиц по размерам определяли методом анализа изображений микрофотографий SEM. Перед нанесением покрытия поверхность подложки подвергли пескоструйной обработке с использованием абразивных частиц из оксида алюминия для удаления оксидного слоя и улучшения адгезии покрытия. Подготовленная поверхность показала среднюю шероховатость *Ra* около 7,7 мкм, обеспечивая достаточное количество точек якорения для частиц во время процесса лазерной наплавки.

Таким образом полученные результаты показали, что частицы отходов могут быть использованы в качестве порошкового сырья для нанесения износостойких покрытия для восстановления изношенных поверхностей деталей нефтепромыслового оборудования.

Литература

1. Скобелев, Д. О. Промышленная политика повышения ресурсоэффективности и достижение целей устойчивого развития / Д. О. Скобелев // Journal of new economy. – 2020. – Vol. 21. – N 4. – P. 153–173.

2. Sustainable recycling of waste metallic powder particles via cold spray additive manufacturing technology / M. Singh, S. W. Khan, A. Anupam, H. Singh // Powder Technology. – 2025. – P. 121915.
3. Комплексный подход к решению технологической задачи получения и применения самофлюсующихся порошков из легированных сплавов на основе железа методом распыления / А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, О. Г. Девойно [и др.] // Литье и металлургия. – 2026. – № 1. – С. 135–141. – DOI 10.21122/1683-6065-2026-1-135-141
4. Пантелеенко, Е. Ф. Особенности диффузионного легирования и расчет толщины боридного слоя полидисперсных систем частиц чугуна / Е. Ф. Пантелеенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2009. – № 1. – С. 3–9.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Ф. А. Аббас

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Разработана робототехническая система инструментообеспечения, обрабатывающего центра на основе мобильного робота.

Ключевые слова: обрабатывающий центр, система инструментообеспечения, мобильный робот, стационарный накопитель.

В рамках настоящей работы процесс автоматизации смены инструмента рассматривается на примере обрабатывающего центра Baver 500. Основной целью является полное исключение участия человека в операциях по замене инструмента в накопителе станка и перенос этих функций на мобильную роботизированную платформу (дале – РТС), оснащенной манипулятором и собственным инструментальным накопителем.

Задача РТС заключается в следующем: извлечение требуемых инструментов из склада, транспортировка их по заранее сформированному маршруту к станку, одновременный сбор отработанных инструментов и установка новых – все это в процессе непрерывной работы станка для достижения максимальной производительности. После завершения цикла замены РТС направляется в заточное отделение, где выполняет разгрузку отработанных инструментов, после чего возвращается на склад.

Рассмотрим функциональные компоненты и последовательность операций более подробно (рис. 1).

На мобильной платформе установлен промышленный манипулятор. Инструменты на полках склада размещены в строго ориентированном положении. Захват манипулятора, оснащенный шпонкой (механизмом ориентации), извлекает инструмент и устанавливает его в барабанный накопитель РТС также в ориентированном положении. Накопитель оснащен приводом на базе сервомотора, волнового редуктора и энкодера. Энкодер обеспечивает точное позиционирование барабана, а волновой редуктор повышает выходной момент, что особенно критично при неравномерной загрузке накопителя (например, когда все инструменты сосредоточены в одной половине барабана). Для предотвращения выпадения инструментов в нижней части накопителя предусмотрены пружинные зажимы.

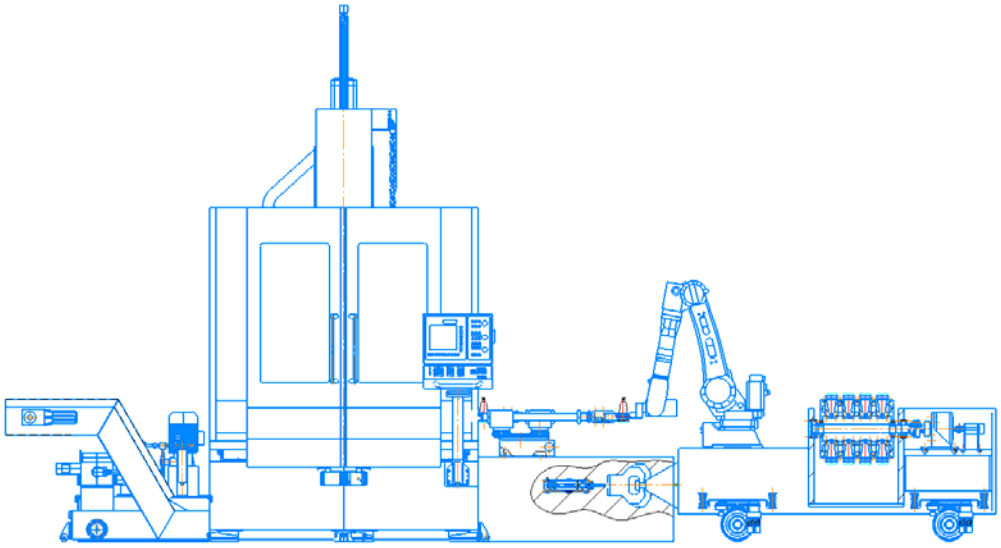


Рис. 1. Общий вид РТК

Перемещение РТС осуществляется с помощью четырех приводных и управляемых колес. Поворот каждого колеса выполняется отдельным сервоприводом через зубчатую передачу; рядом с большой шестерней размещены датчики положения. Привод колеса соединен напрямую с колесным валом, а на противоположной стороне установлен энкодер. Конструкция обеспечивает поворот на 360°, позволяя РТС разворачиваться на месте и двигаться в любом направлении без ограничений по траектории.

При подходе к станку из-за проскальзывания и упругой деформации колес возникает накопленная погрешность позиционирования. Для ее устранения применяется цанговый зажим, который жестко фиксирует платформу относительно станка. Кроме того, цанговый зажим повышает устойчивость системы к внешним возмущениям, исключая дополнительную погрешность позиционирования схвата манипулятора, возникающую вследствие инерционных сил при перемещении инструмента.

Последовательность взаимодействия с накопителем станка следующая. Манипулятор РТС захватывает новый инструмент, переворачивает его и передает роботу станка. Робот станка захватывает инструмент ниже кольцевой проточки, проворачивает и устанавливает его в гнездо накопителя. Одновременно робот извлекает отработанный инструмент и после поворота накопителя удерживает его до момента, когда манипулятор РТС захватит его и разместит в собственном накопителе платформы.

После завершения загрузки отработанных инструментов цанговый зажим разжимается, и РТС следует в заточное отделение. Там аналогично складу инструмент размещается в специализированных ячейках. По завершении полной разгрузки мобильная платформа возвращается на склад и переходит в режим ожидания (зарядки аккумуляторной батареи).

Таким образом, предложенная архитектура позволяет полностью автоматизировать цикл смены инструмента без остановки технологического оборудования и минимизировать участие человека в процессе.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

К. В. Козаченко

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Разработан алгоритм прохождения микросигналов в системе управления мобильным роботом. На основании разработанного алгоритма составлена программа с использованием языков программирования C++ и Python, позволяющих работать роботу в автономном режиме.

Ключевые слова: система инструментообеспечения, мобильные роботы, программирование.

Целью данной работы является разработка программного комплекса для робототехнического комплекса (РТК) системы инструментообеспечения. В работе решаются следующие задачи: разработка многоуровневой архитектуры программного обеспечения на базе ROS 2, обоснование выбора языков программирования для каждого уровня, описание взаимодействия узлов и алгоритма смены инструмента.

При разработке программного комплекса для РТК ключевым решением является выбор языков программирования, так как система включает задачи, требующие высокой производительности и работы в реальном времени, а также логические задачи с нежесткими временными ограничениями. В проекте используются два языка: C++ и Python. C++ применяется для компонентов, где критичны скорость выполнения и детерминизм: драйверы приводов колес, вычисляющие управляющие сигналы для сервомоторов; узлы обработки данных с лидара (построение карты, локализация, обнаружение препятствий); захват и обработка видеопотока с камеры через OpenCV; драйверы UWB-приемника, где важна точная временная привязка измерений. Дополнительным преимуществом C++ является возможность использования реального времени в ROS 2 с соответствующими настройками ядра Linux.

Python выбирается для задач, где приоритетны гибкость разработки и скорость написания кода: верхний уровень архитектуры, взаимодействующий с системой управления предприятием, ведущий базу данных инструментов и принимающий заявки от станков; алгоритмы управления процессом смены инструмента с реализацией конечного автомата; драйверы простых дискретных датчиков (индуктивных, оптических, ультразвуковых), частота опроса которых невелика; вспомогательные узлы мониторинга, логирования и визуализации. Взаимодействие между узлами на разных языках осуществляется стандартными механизмами ROS 2.

Программный комплекс разрабатывается в среде ROS 2, обеспечивающей модульность, поддержку распределенной работы, наличие готовых пакетов для навигации, SLAM и управления манипуляторами. Предлагается трехуровневая архитектура.

Верхний уровень (стратегическое планирование) отвечает за глобальную координацию РТК в производственной системе. Реализованный на Python, он взаимодействует с системой управления предприятием, принимает заявки на смену инструмента от обрабатывающего центра, планирует маршрут с учетом заряда батареи и наличия инструментов в накопителе, ведет базу данных инструментов.

Средний уровень (управление задачами и навигация) координирует исполнительные узлы. Навигационная подсистема, получающая от верхнего уровня целевые точки, имеет критичные по времени части (обработка облака точек с лидара, локальное планирование траектории), реализованные на C++. Подсистема управления задачами на Python реализует алгоритм смены инструмента через конечный автомат; каждое действие оформлено как ROS-действие для отслеживания хода и прерывания.

Нижний уровень (драйверы и исполнительные узлы) обеспечивает непосредственное управление аппаратурой. На C++ реализованы драйверы приводов колес (команды скорости в сигналы для сервомоторов с обратной связью по энкодерам), драйвер манипулятора (перемещение схвата в заданную точку), драйверы лидара, камеры и UWB-приемника. На Python реализованы драйверы дискретных датчиков (контроль закрытия схвата, наличие инструмента в ячейках, ультразвуковые).

Для точного позиционирования РТК используется комбинированный подход по зонам. На складе инструментов, где нужно приблизительное определение координат, применяется система абсолютного позиционирования на основе UWB-маяков. В углах помещения устанавливаются стационарные маяки, на борту РТК – приемник. Измеряя расстояния методом Time of Flight, система вычисляет координаты с погрешностью 10–15 см, что допустимо для грубой навигации. Обработка UWB-данных реализована на C++.

При движении от склада к станку UWB не используется – применяется метод SLAM на основе данных лидара (частота – 20 Гц). Алгоритм SLAM на C++ с библиотекой PCL одновременно строит карту и оценивает положение РТК. Камера на борту РТК работает постоянно для распознавания препятствий, а ее видеопоток обрабатывается на C++ с использованием OpenCV.

В работе предложена трехуровневая архитектура программного комплекса РТК для автоматизации инструментообеспечения обрабатывающего центра. Обосновано распределение языков: C++ – для производительных и real-time задач (драйверы приводов, обработка лидара, локальное планирование, захват видеопотока); Python – для логических задач, работы с базами данных, алгоритмов управления и драйверов простых датчиков. Уровни взаимодействуют через топики, сервисы и действия ROS 2. Разработанный комплекс может быть реализован на базе ROS 2.

Литература

1. Ху,Чуньсюй. ROS 2. Программирование интеллектуальных роботов : пер. с англ. / Ху Чуньсюй, Ли Цяолун. – М. : ДМК-Пресс, 2025. – 544 с.
2. Бжихатлов, И. А. Операционная система для роботов ROS : учеб. пособие / И. А. Бжихатлов. – СПб. : Университет ИТМО, 2025. – Ч. 1. – 109 с.
3. Лавренов, Р. О. Основы ROS1 и ROS2 : учеб.-метод. пособие / Р. О. Лавренов, Е. А. Магид. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2024. – 43 с.

СЕКЦИЯ II
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Д. В. Пермяков

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

Научный руководитель Ю. В. Мартьянов

Выполнен обзор особенностей численного моделирования пластической деформации металлов. Дано описание процессов деформации и мест в моделях, на которые следует обратить пристальное внимание инженеру.

Ключевые слова: моделирование, металл, дефекты, напряжения.

Моделирование процессов деформации металлов – это сложная задача, требующая учета множества факторов, связанных с изменением структуры материала на разных масштабах. Опишем ключевые особенности этого процесса.

При пластической деформации в металлах происходит накопление и движение дефектов, дислокаций. Эти процессы сопровождаются изменением внутренней структуры материала как в объеме, так и на поверхности. Моделирование должно учитывать появление и развитие таких дефектов, поскольку именно они определяют поведение металла под нагрузкой и в процессе пластической деформации.

Современные методы моделирования используют подходы нелинейной динамики и фрактального анализа. Поверхностные и объемные дефекты при деформации образуют самоподобные структуры – фракталы. Анализ фрактальных характеристик позволяет выявлять критические стадии деформации и прогнозировать разрушение материала.

В процессе деформации внутренние (объемные) и внешние (поверхностные) изменения в металле происходят согласованно до определенного момента. Математический разрыв этой корреляции служит индикатором перехода материала в критическую стадию, предшествующую разрушению. Это позволяет использовать поверхность металла как для оценки его состояния [1].

Важной особенностью является локализация деформации – появление зон, где материал деформируется интенсивнее всего. Моделирование позволяет выявлять такие зоны и прогнозировать их развитие, чтобы избежать аварийных ситуаций.

Внутри материала существуют энергетические барьеры, удерживающие изломы (дефекты структуры). Их смещение может кардинально изменить механические свойства материала, делая одни зоны мягкими, а другие – жесткими. Управление этими процессами – одна из задач моделирования.

Главная цель моделирования – прогнозировать интервалы устойчивой работы металлических конструкций и выявлять предвестники разрушения на ранних стадиях, когда традиционные методы контроля еще не эффективны.

Пример деформации металла под нагрузкой представлен на рис. 1.

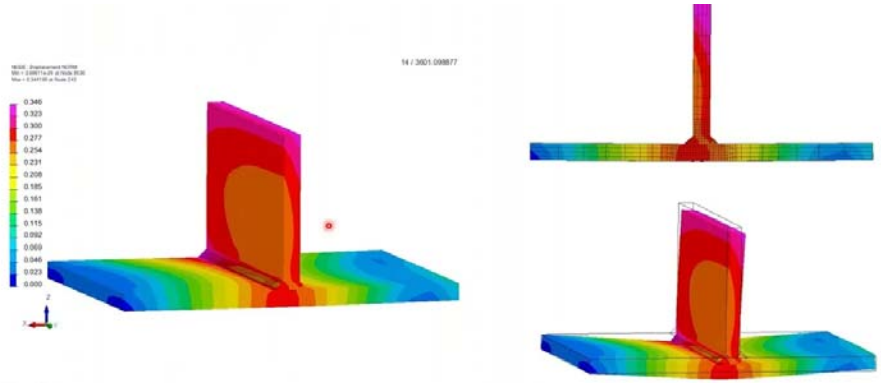


Рис. 1. Деформация металла под нагрузкой

Моделирование процессов деформации металлов представляет собой многоуровневую задачу, требующую учета как макроскопических, так и микроскопических изменений в структуре материала. Ключевой особенностью является необходимость отслеживать эволюцию дефектов кристаллической решетки, поскольку именно они определяют характер и степень деформации. Современные методы моделирования опираются на анализ фрактальных и самоподобных структур, возникающих на поверхности и в объеме металла, что позволяет выявлять критические стадии деформации и прогнозировать разрушение с высокой точностью. Кроме того, моделирование должно учитывать локализацию деформации и влияние внутренних изломов, которые могут изменять механические свойства материала. Комплексный подход к моделированию, сочетающий анализ микроструктуры, фрактальных характеристик и прогнозирование критических состояний, позволяет не только повысить надежность и долговечность металлических конструкций, но и обеспечить их безопасную эксплуатацию в различных отраслях промышленности.

Пример модели сложной деформации свивкой представлен на рис. 2 [2].

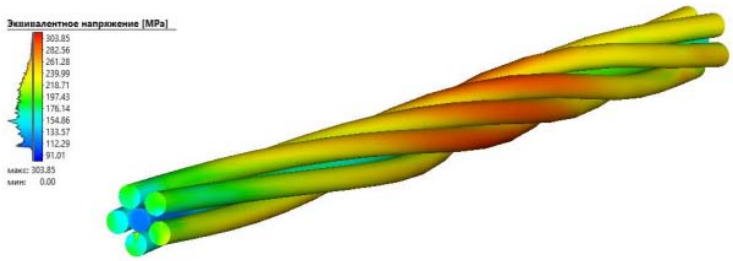


Рис. 2. Пример модели сложной деформации свивкой

Цветокодированное изображение показывает картину величин и распределений эквивалентных напряжений, называемых напряжениями по Мизесу. Анализ напряженного состояния металла при деформации позволяет оптимизировать технологические процессы производства изделий из металлов, а также спроектировать новую или модернизировать существующую оснастку для достижения определенного воздействия на металл при его деформации.

Таким образом, численное моделирование процессов пластического деформирования является актуальным направлением развития промышленного производства изделий из металлов.

Литература

1. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением : учебник / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1947. – 532 с.
2. Мартьянов, Ю. В. Моделирование процессов сложной деформации металлов / Ю. В. Мартьянов, Ю. Л. Бобарикин // IV Республиканский форум молодых ученых учреждений высшего образования с международным участием : сб. материалов форума, Гомель, 18–20 мая 2025 г. / Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2025. – С. 40–41.

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. Н. Мельников

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

Научный руководитель Ю. В. Мартьянов

Отражено современное состояние, прикладные возможности и перспективные направления применения численного моделирования в металлургии и машиностроении.

Ключевые слова: метод конечных элементов, моделирование, выявление дефектов металла.

Подготовка технологии производства является важным этапом в процессе разработки новой продукции. Помимо проектирования детали согласно требованиям и стандартам инженеры должны убедиться, что деталь может быть изготовлена с заданной точностью с использованием существующего оборудования. Недостаточно спроектировать деталь и просчитать ее работоспособность в процессе жизненного цикла. Следует удостовериться, что эта деталь может быть с заданной точностью создана на существующем оборудовании – например, учесть эффекты обратного пружинения, остаточных деформаций, коробления детали. Требуется правильно спроектировать оснастку: матрицы, пуансоны, крепежный инструмент – и подобрать оптимальные режимы его работы, разработать техническую документацию на процессы.

Изучение изменений различных технологических процессов на реальных устройствах имеет множество недостатков (например, невозможность масштабного изменения параметров устройства, возможность ошибок устройства при отладке и т. д.). В связи с этим оптимизация существующих производственных процессов и внедрение в производство новой продукции требует значительных вложений времени, материалов.

В настоящее время существует множество методов имитационного моделирования. Из них метод конечных элементов (МКЭ) является наиболее популярным методом моделирования и решения инженерных задач. В математическом плане метод относится к группе вариационно-разностных. Строгое доказательство таких важных свойств как устойчивость, сходимость и точность метода осуществляется в соответствующих разделах математики и часто является сложной задачей.

В общем случае алгоритм МКЭ состоит из следующих трех стадий [1]. Процедура метода конечных элементов состоит в следующей последовательности шагов:

1. Препроцессорная стадия (подготовка данных), которая включает:

– анализ исходных данных и выбор расчетной схемы;

– задание геометрических форм и размеров объекта в соответствии с выбранной расчетной схемой;

– задание физических свойств среды;

– выбор типов используемых конечных элементов;

– дискретизация объекта на конечные элементы (рис. 1);

– задание граничных условий.

2. Процессорная стадия (решение), включающая:

– определение компонент глобальной матрицы и глобального вектора по параметрам конечных элементов и известным внешним воздействиям;

– преобразование системы уравнений с учетом граничных условий;

– решение системы уравнений относительно вектора неизвестных узловых переменных.

3. Постпроцессорная стадия (анализ решения):

– вычисление предусмотренных постановкой задачи выходных параметров (деформаций, скоростей деформаций, напряжений, сил, работы деформирования) по полученным значениям неизвестных узловых переменных.

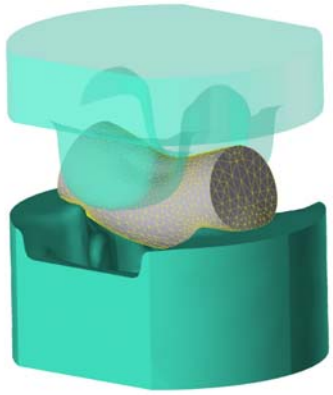


Рис. 1. Дискретизация объекта
на конечные элементы

Приведенная последовательность характерна для решения линейных задач. В том случае, если в задаче есть существенные нелинейности (например, наличие контактов – геометрическая нелинейность, пластичность – физическая нелинейность), то процесс решения осуществляется за несколько шагов, на каждом из которых выполняется итерационное решение.

При моделировании технологических процессов можно учитывать реальную кинематику оборудования любой сложности и типа, различные модели материала (упругие, пластичные, с учетом упрочнения и т. д.), трение и контакт между инструментами и деталями, а также самоконтакт в формирующейся детали для прогнозирования образования складок, утяжин металла (рис. 2), термодинамику процесса и др. [2].

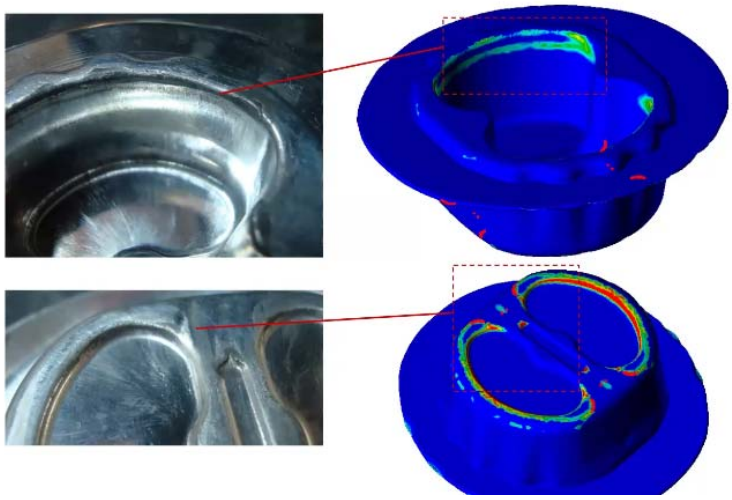


Рис. 2. Выявление возможных дефектов
в процессе моделирования

Использование численного моделирования технологических процессов может привести к значительной экономии средств, поскольку моделирование процесса и выбор оптимальных параметров работы оборудования необходимы до принятия окончательного решения по технологическому оборудованию и организации производства.

Наиболее перспективные разработки и примеры их применения в области численного моделирования технологических процессов дают основу для увеличения доли информационной составляющей систем инженерного анализа и математического моделирования в структуре программ подготовки специалистов инженерного профиля.

Ожидается, что в ближайшем будущем резко возрастут масштабы и эффективность прикладного использования численных методов и моделей в металлургии, машиностроении и смежных отраслях. Не исключается интеграция с ИИ и машинным обучением. Нейросети обучаются на результатах тысяч готовых расчетов и затем мгновенно выдают близкий к точному результат для новых параметров. По сравнению с традиционным методом это значительно уменьшит время расчетов, что в условиях быстро меняющегося производства является ключевым фактором.

Таким образом, численное моделирование – это мощный инструмент для проектирования процессов формоизменения, который позволяет увидеть ошибку на этапе проектирования. Такие особенности дают современным инженерам возможности быстро адаптировать оснастку под технологические процессы деформации.

Литература

1. Одарченко, И. Б. Математическое моделирование металлургических и литейных процессов : учеб. пособие / И. Б. Одарченко, В. А. Жаранов, И. Н. Прусенко ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 272 с.
2. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением : учебник / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1947. – 532 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТАМПОВКИ СРЕДСТВАМИ QForm

Я. И. Левковец

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

Научный руководитель Ю. В. Мартьянов

Выполнен обзор особенностей численного моделирования в среде QForm. Дано описание процесса штамповки с помощью встроенных инструментов QForm. Даны основные сведения об анализе дефектов при штамповке.

Ключевые слова: моделирование, штамповка, дефекты, напряжения.

В современных условиях производства к процессам обработки металлов давлением предъявляются все более серьезные требования. Основными задачами являются снижение материалоемкости, сокращение цикла подготовки производства и гарантия высокого качества изделий. Традиционный метод, основанный на натурных экспериментах и доводке штампового инструмента, сегодня является экономически нецелесообразным и технически устаревшим.

Цифровые преобразования в отрасли машиностроения определяют необходимость перехода к широкому использованию систем конечно-элементного анализа. Одним из наиболее мощных инструментов в этой области является российский программный комплекс QForm, предназначенный для моделирования процессов прокатки, ковки, объемной и листовой штамповки и т. п.

Целью данной работы является исследование возможностей оптимизации технологических параметров штамповки с использованием инструментов компьютерного моделирования для минимизации дефектов и увеличения ресурса инструмента.

Программный комплекс QForm основан на методе конечных элементов (МКЭ). В основе метода лежат уравнения термомеханически связанной задачи, объединяющие решение уравнений равновесия, условий пластического течения и уравнений теплопроводности [1].

Одной из ключевых особенностей QForm является использование полностью адаптивной гексагональной или тетраэдрической сетки (рис. 1).

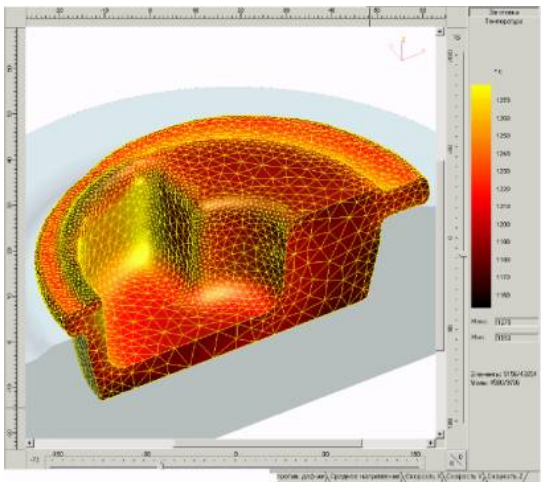


Рис. 1. Пример конечноэлементной сетки при моделировании горячей штамповки

В процессе деформации, когда ячейки подвергаются значительным искажениям, программа в автоматическом режиме производит перестроение сетки (remeshing), что позволяет избежать численной нестабильности и корректно моделировать сверхбольшие пластические деформации, характерные для объемной штамповки [2].

Процесс моделирования в QForm включает в себя несколько этапов:

• **Геометрическое моделирование:** импорт 3D-моделей заготовки и инструмента (в форматах STEP или IGES). На этом этапе задаются зазоры, радиусы скруглений и штамповочные уклоны.

• **Задание свойств материала:** выбор реологических моделей из встроенной базы данных. Программа учитывает зависимость сопротивления деформации от степени деформации, скорости деформации и температуры.

• **Определение граничных условий:** задаются параметры оборудования (кривошипный пресс, молот, гидравлический пресс), коэффициенты трения по закону Зибеля или Амонтона–Кулона, а также условия теплообмена с окружающей средой и инструментом.

• **Анализ результатов моделирования:** в ходе выполнения имитационного моделирования пользователь получает доступ к исчерпывающей информации о напряженно-деформированном состоянии металла.

Основной фактор штамповки – это заполнение штамповой полости. QForm позволяет визуализировать линии тока металла и выявить зоны вероятного незаполнения профиля или образования зажимов. Обнаружение дефекта «складки» на этапе проектирования позволяет изменить геометрию ручьев или форму исходной заготовки без изготовления реальной оснастки [3].

Важным аспектом является анализ температурных полей. В процессах горячей штамповки температура заготовки изменяется: наблюдается охлаждение при контакте с инструментом, локальный разогрев за счет рассеивания механической энергии в тепловую [4]. Превышение температуры солидуса может привести к пережогу, а чрезмерное охлаждение – к росту усилий деформирования и поломке инструмента. Моделирование позволяет оптимизировать температурно-скоростной режим штамповки и избежать данные дефекты [5].

Программа QForm позволяет оценить распределение нормальных напряжений на поверхности штампа и термическую цикловую нагрузку. Используя критерии износа (например, модель Арчарда), мы можем прогнозировать зоны наиболее интенсивного истирания и корректировать твердость и другие свойства в этих областях.

Использование программного комплекса QForm является современным актуальным инструментом для машиностроительного и металлургического производства в котором обеспечивается сокращение сроков освоения новых изделий в 2–3 раза, снижение себестоимости за счет экономии металла и увеличения ресурса штампов. Обеспечивается контроль качества внутренней структуры металла за счет управления распределением деформаций.

Литература

1. QForm 10.1. Руководство пользователя. – URL: https://www.q princípio.com/api/files/c43605/ac73c3/qform_manual_part1.russian.pdf.
2. QForm. Документация программного комплекса. – URL: https://qform3d.ru/products/documentation/ (дата обращения: 06.04.2026).
3. Бородулинский, И. В. Обработка металлов давлением: моделирование процессов в QForm / И. В. Бородулинский, В. А. Митрохин // Обработка металлов давлением. – 2022. – № 4. – С. 37–42.

4. Современные методы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением / под ред. проф. А. А. Попова. – Минск : БНТУ, 2020. – 240 с.
5. Дудко, А. А. Моделирование процессов штамповки в среде конечно-элементных программ / А. А. Дудко, А. В. Федоров. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 186 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОСЛЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАПЛАВКИ

В. М. Борисевич, С. В. Рогов

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

Представлены результаты разработки самофлюсующихся диффузионно-легированных порошков на основе отходов чугунной дроби для магнитно-электрической наплавки (МЭН) поверхностей деталей машин. Исследовано влияние состава (содержание бора, добавка карбида вольфрама) на микротвердость и износостойкость покрытий. Установлено, что покрытие из порошка с 20 мас. % WC и содержанием бора 9,1 % повышает износостойкость в 5–10 раз относительно закаленной стали 45 и в 2–3 раза относительно стали 95Т. Приведены результаты экспериментов в лаборатории ГГТУ им. П. О. Сухого.

Ключевые слова: магнитно-электрическая наплавка, диффузионное легирование, самофлюсующийся порошок, чугунная дробь, карбид вольфрама, износостойкость, лопасть смесителя.

Большинство деталей машин выходят из строя вследствие износа тонкого рабочего слоя. Для поверхностей, контактирующих с песком, отсевом гранита, полимерными присадками и влагой, характерно интенсивное абразивное и ударно-абразивное изнашивание. Стали 95Т контактируя с абразивом (песок и т. п.) имеют низкий ресурс, а наплавка пластин твердого сплава удорожает изделие и не исключает износа основы между пластинами. Цель работы – разработка рекомендаций по выбору наплавочных материалов для магнитно-электрического наплавки (МЭН) рабочей части поверхности, обеспечивающих высокую износостойкость при минимальной себестоимости.

Методика исследований

Сущность метода МЭН заключается в совокупном воздействии на ферромагнитный порошок (ФМП) и обрабатываемую поверхность электрического тока, внешнего магнитного поля и механического давления. Частицы порошка, ориентируясь вдоль магнитных силовых линий, образуют токопроводящие цепочки, расплавляются под действием разрядов и переносятся на деталь-катод.

Исходный материал – порошок чугуна СЧ20 фракции 200 мкм. Проведено диффузионное борирование по трем режимам:

– порошок № 1: 1 ч при 950 °С;

– порошок № 2: 3 ч при 950 °С;

– порошок № 3: 3 ч при 950 °С + 15 мас. % измельченных отходов карбида вольфрама WC.

Для сравнительных испытаний использовались: ферробор ФБ-17, легированный чугун СЧЛ, самофлюсующийся никелевый сплав RW 12496 (Castolin Eutectic). Поверхности упрочнялись на лабораторной установке МЭН. Микротвердость измерялась на ПМТ-3 при нагрузке 0,981 Н. Износостойкость оценивалась на машине трения в условиях ударно-абразивного изнашивания; эталон – закаленная сталь 45 (HRC 45–50).

Результаты и обсуждение

Микроструктура и микротвердость. Покрытие из порошка № 3 представляет собой гетерогенный материал: пластичная металлическая матрица с распределенными в ней твердыми боридами FeB и карбоборидами. Наличие бора (9,1 ± 0,5 мас. %) обеспечивает самофлюсовани – раскисление оксидных пленок и формирование беспористого слоя. Микротвердость покрытия из порошка № 3 достигает значений, сопоставимых с никелевым сплавом и значительно превосходит ФБ-17 и СЧЛ. Распределение микротвердости по глубине показывает наличие закаленной переходной зоны, критически важной для сопротивления ударным нагрузкам.

Износостойкость. Кинетика изнашивания образцов, упрочненных различными порошками, представлена кривыми с характерными периодами приработки, установившегося износа и катастрофического разрушения (рис. 1).

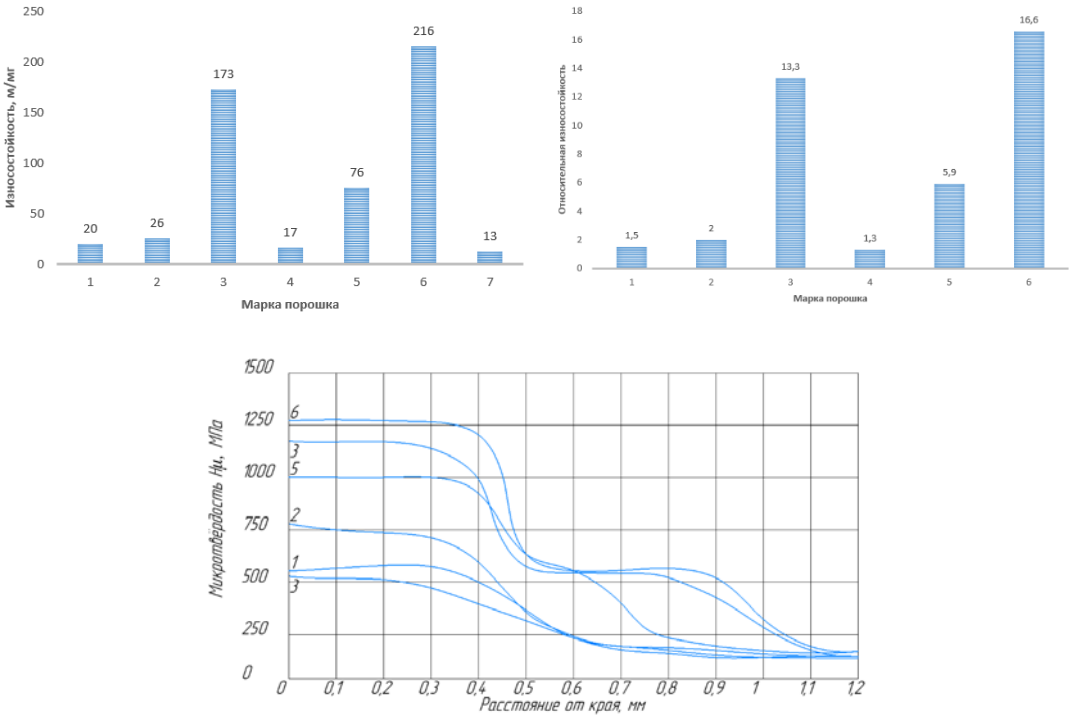


Рис. 1. Кинетика изнашивания образцов

Относительная износостойкость на участке установившегося трения составила:
– ФБ-17 – 1,5;
– СЧЛ – 2,0;
– порошок № 1 – 5,9;
– порошок № 2 – 13,3;
– порошок № 3 – 16,6;
– RW 12496 – 16,6 (эталон – 1,0).

Таким образом, порошок № 3 по износостойкости не уступает дорогостоящему импортному аналогу RW 12496 и превосходит традиционные материалы при МЭН в 8–10 раз. Прирост свойств обусловлен сочетанием высокого содержания бора (образование боридной фазы) и присутствием дисперсных частиц WC, принимающих на себя основную абразивную нагрузку.

Результат

В лаборатории ГГТУ им. П. О. Сухого проведено упрочнение поверхностей деталей машин. Перед нанесением покрытия поверхность подвергалась пескоструйной очистке. Эксплуатационные испытания показали:

– срок службы поверхности с покрытием из порошка № 3 на 10–15 % выше, чем у поверхностей с напаянными пластинами из твердого сплава;

– срок службы в 2–3 раза выше, чем у поверхности из стали 95Т.

Дополнительный эффект – снижение стоимости восстановления за счет использования отходов чугунной дроби и отсутствия необходимости в дорогостоящей оснастке.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Состав наплавочного материала критически влияет на микротвердость и износостойкость покрытий при МЭН. Введение бора обеспечивает самофлюсование и формирование твердых боридов; добавка WC кратно повышает сопротивление абразивному износу.

2. Порошковая смесь на основе борированной чугунной дроби (3 ч, 950 °С) с 15–20 мас. % карбида вольфрама обеспечивает относительную износостойкость.

3. В результате проведенных экспериментов в 2–3 раза по сравнению со сталью 95Т и на 10–15 % по сравнению с напайкой твердого сплава повышается износостойкость поверхности.

Литература

1. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск : Технопринт, 2001. – 300 с.
2. Петришин, Г. В. Износостойкие покрытия, получаемые методом магнитно-электрического упрочнения из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков на основе отходов производства стальной дроби : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Петришин Григорий Валентинович ; Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2006. – 24 с.
3. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск : Технопринт, 2000. – 268 с.
4. Люцко, В. А. Технология и установки магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Люцко Василий Александрович. – Новополоцк, 2004. – 24 с.

ПОЛУЧЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ФИЛЬТРОВ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. В. Горовцова

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Рассмотрены способы получения градиентных фильтров с использованием аддитивных технологий. Градиентные фильтры, представляющие собой многослойные пористые материалы с постепенно уменьшающимся размером пор по направлению фильтрации, обеспечивают высокую эффективность разделения частиц различного размера. Показаны ограничения традиционных методов изготовления фильтров (спекание, формование волокон, вспенивание полимеров) и обоснованы преимущества аддитивного подхода: точный контроль геометрии пор, воспроизводимость структуры, возможность создания сложных градиентных конфигураций и снижение отходов производства. Описаны способы формиро-

вания пористости при 3D-печати, включая управление параметрами печати, изменение решетчатых структур, применение различных материалов и постобработку. Приведена классификация методов аддитивного производства применительно к изготовлению градиентных фильтров, отмечены перспективы их развития.

Ключевые слова: градиентные фильтры, аддитивные технологии, 3D-печать, пористые структуры, фильтрация.

Фильтрационные материалы играют важную роль в химической промышленности, биотехнологии, медицине, системах очистки воды и газов. Одним из наиболее эффективных типов фильтров являются градиентные фильтры, обладающие пространственно изменяемой структурой пор. Такие фильтры представляют собой многослойные пористые материалы, в которых размер пор постепенно уменьшается по направлению движения фильтруемой среды.

Градиентные фильтры представляют собой фильтрационные материалы с изменяющейся по толщине пористой структурой. В отличие от традиционных фильтров, где размер пор практически одинаков по всему объему, в градиентных фильтрах поры постепенно уменьшаются по направлению движения фильтруемой среды. Такая структура обеспечивает последовательное задержание частиц разных размеров.

Процесс фильтрации начинается с прохождения жидкости или газа через первый слой фильтра, имеющий наиболее крупные поры. Этот слой выполняет функцию предварительной очистки и задерживает крупные частицы загрязнений, такие как механические примеси, пыль и крупные агрегаты молекул. Благодаря относительно большим порам поток среды свободно проходит через данный слой, что предотвращает быстрое засорение фильтра. Далее поток проходит через второй слой с меньшим размером пор. На этом этапе задерживаются частицы среднего размера, например, коллоидные частицы и мелкие суспензии. Данный слой обеспечивает более тонкую очистку среды. Последний слой фильтра имеет наиболее мелкие поры и предназначен для задержания самых маленьких частиц, включая крупные молекулы, мелкодисперсные примеси и микроорганизмы. В некоторых случаях такие фильтры способны задерживать даже ионы растворенных веществ.

Традиционные методы получения фильтрующих материалов, такие как спекание порошков, формование волокон или вспенивание полимеров, имеют ряд ограничений. Они позволяют создавать градиентные структуры лишь приближенно, например, путем прессования нескольких слоев с разной плотностью, однако точный контроль геометрии пор и их распределения по объему изделия практически недостижим.

Аддитивные технологии позволяют создавать фильтрационные материалы с контролируемой пористой структурой и заранее заданным распределением размеров пор. В отличие от традиционных методов изготовления фильтров, при которых пористость формируется случайным образом или за счет механического смешивания материалов, 3D-печать дает возможность точно управлять внутренней геометрией изделия. Благодаря этому становится возможным формирование градиентных фильтров, в которых размер пор постепенно уменьшается по толщине материала. Такой подход позволяет создавать фильтры с высокой эффективностью очистки и оптимальной пропускной способностью.

Процесс создания градиентных фильтров с использованием аддитивных технологий включает несколько основных принципов формирования пористой структуры.

Управление пористостью материала. Одним из наиболее распространенных методов является регулирование общей пористости материала непосредственно

в процессе печати. Пористость можно изменять за счет изменения параметров печати, таких как толщина слоя, мощность лазера, скорость сканирования или плотность укладки материала. При печати верхние слои фильтра могут формироваться с меньшей плотностью структуры, что приводит к образованию крупных пор. По мере формирования последующих слоев плотность материала постепенно увеличивается, а размер пор уменьшается. В результате формируется градиентная структура, которая обеспечивает последовательную фильтрацию частиц различных размеров.

Изменение геометрии внутренней решетчатой структуры. Современные системы компьютерного моделирования позволяют проектировать сложные пористые структуры еще на этапе создания цифровой модели фильтра. Внутренняя структура фильтра может быть представлена в виде различных решетчатых или ячеистых элементов. К таким структурам относятся тетраэдрические, кубические, гексагональные и другие типы решеток. Изменяя размер ячеек и толщину перемычек между ними по толщине изделия, можно создавать фильтры с постепенным уменьшением размеров пор. Такой метод широко используется при экструзионной 3D-печати полимерных материалов, а также при лазерном спекании порошков.

Использование различных материалов или композиций. Еще одним способом создания градиентных фильтров является применение нескольких материалов с различными физическими свойствами. В процессе аддитивного производства возможно постепенное изменение состава материала, например, путем смешивания порошков различного размера или использования материалов с различной степенью спекания. Это позволяет формировать участки фильтра с различной плотностью и пористостью. В некоторых случаях применяются композиционные материалы, включающие полимеры, керамику или металлические порошки. Такие материалы позволяют создавать фильтры, обладающие высокой механической прочностью и устойчивостью к агрессивным химическим средам.

Контроль размера частиц исходного порошка. При использовании порошковых аддитивных технологий, таких как селективное лазерное спекание или селективное лазерное плавление, важную роль играет размер исходных порошковых частиц. Более крупные частицы порошка после спекания образуют более крупные поры, тогда как мелкие порошки формируют более плотную структуру. Используя порошки различной дисперсности на разных этапах печати, можно создавать фильтры с выраженным градиентом пористости. Постобработка и дополнительная модификация структуры.

После завершения процесса печати фильтрационный материал может подвергаться дополнительной обработке, которая также влияет на структуру пор. К таким методам относятся термическая обработка, химическое травление, вымывание связующих компонентов и спекание. Эти процессы позволяют дополнительно регулировать размер пор, улучшать механические свойства материала и повышать устойчивость фильтра к внешним воздействиям.

В зависимости от используемого материала и принципа формирования слоев можно выделить несколько основных методов аддитивного производства, применяемых для создания градиентных фильтров:

1. *Экструзионные методы* (*FDM/FFF*) – наиболее доступные и распространенные. Позволяют создавать градиентные фильтры из термопластичных полимеров с контролируемой структурой пор за счет изменения расстояния между нитями материала. Преимуществом является простота и низкая стоимость оборудования.

2. *Фотополимеризационные методы* (*SLA, DLP*) – обеспечивают высокую точность формирования пор и возможность работы с фотополимерными смолами, включая биосовместимые. Особенно эффективны для создания микрофильтрацион-

ных элементов с размером пор до 50–100 мкм. Градиентная структура достигается за счет изменения экспозиционных параметров (мощности и времени засветки) по высоте изделия, а также постепенного уменьшения размера ячеек или изменения толщины перемычек между ними в цифровой модели.

3. *Порошковые методы* (*SLS, SLM*) – позволяют изготавливать фильтры из металлов, керамики и тугоплавких полимеров. Такие фильтры обладают высокой термостойкостью и химической инертностью. Градиент достигается изменением параметров лазерного спекания.

4. *Струйные методы* (*PolyJet, MultiJet*) – дают возможность одновременно использовать несколько материалов с различными свойствами, что особенно ценно для создания композиционных градиентных структур.

Дальнейшее развитие технологий 3D-печати открывает новые возможности для создания градиентных фильтров. Основными направлениями исследований являются:

• Разработка новых материалов, специально предназначенных для аддитивного производства фильтрующих элементов.

• Совершенствование методов математического моделирования фильтрационных процессов для оптимального проектирования градиентных структур.

• Создание гибридных технологий, сочетающих несколько методов печати в одном процессе.

• Масштабирование производства от лабораторных образцов к промышленному выпуску.

Градиентные фильтры представляют собой перспективный класс фильтрационных материалов, обеспечивающих высокую эффективность очистки и длительный срок службы. Применение аддитивных технологий для их создания позволяет реализовать принципиально новые подходы к проектированию пористых структур и получать изделия с уникальными характеристиками, недостижимыми при использовании традиционных методов производства.

Методы 3D-печати дают возможность точно контролировать размер, форму и распределение пор по объему фильтра, создавать сложные градиентные структуры и использовать широкий спектр материалов – от полимеров до тугоплавких металлов и керамики. Это открывает путь к созданию фильтров нового поколения для различных отраслей промышленности, медицины и биотехнологии. Дальнейшее развитие аддитивных технологий, совершенствование методов моделирования и появление новых материалов позволит расширить области применения градиентных фильтров и повысить эффективность процессов фильтрации в самых различных областях науки и техники.

Литература

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : учеб. пособие / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина ; М-во образования и науки Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 223 с.
2. Горовцова, В. В. Исследование возможности получения градиентных фильтров / В. В. Горовцова // МИТРо 2025 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : материалы докл. науч.-техн. конф., Гомель, 5 дек. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2025. – С. 63–65.

ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В. С. Сурма

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Рассмотрены особенности применения аддитивных технологий при создании изделий из функционально-градиентных материалов. Показано, что их использование позволяет управлять физико-механическими свойствами материалов в различных зонах изделия, обеспечивая требуемые характеристики эксплуатации.

Ключевые слова: функционально-градиентные материалы, аддитивные технологии, композиционные материалы, селективное лазерное плавление, численное моделирование.

Развитие материаловедения и технологий производства привело к появлению функционально-градиентных материалов (ФГМ), которые стали важным направлением современной инженерной деятельности. Эти материалы характеризуются постепенным изменением состава, структуры и свойств в пределах одного изделия, что позволяет получать конструкции с заданными и улучшенными эксплуатационными характеристиками. В настоящее время использование ФГМ в аддитивных технологиях рассматривается как перспективный путь повышения эффективности производства и создания изделий нового поколения.

Концепция функционально-градиентных материалов была впервые разработана в Японии в 1980-х гг. для решения конкретной задачи аэрокосмической отрасли – создания термостойких материалов, способных выдерживать экстремальный перепад температур (более 1000 °С) на поверхности и внутри космического аппарата. Сегодня же благодаря развитию аддитивных технологий мы можем не только воспроизводить, но и значительно расширять возможности градиентных материалов.

Функционально-градиентные материалы представляют собой композиционные или однофазные материалы, свойства которых изменяются по определенному направлению. Они могут состоять из нескольких компонентов, например, металлической матрицы и упрочняющих частиц, содержание которых изменяется в объеме изделия. Такая структура обеспечивает сочетание высокой прочности, твердости и устойчивости к механическим нагрузкам. В отличие от традиционных композитов, где свойства материалов изменяются скачкообразно, ФГМ обладают плавным переходом характеристик, что снижает вероятность возникновения внутренних напряжений и разрушения конструкции.

Природные объекты служат наглядным примером использования градиентных структур. Например, бамбук имеет градиентное распределение сосудистых пучков целлюлозы: их объемная доля увеличивается, а размер уменьшается от внутренней поверхности стебля к внешней. Это обеспечивает оптимальное сочетание прочности и жесткости. Аналогично костная ткань человека характеризуется плавным переходом от плотной кортикальной внешней структуры к пористой губчатой внутренней, что обеспечивает ее устойчивость к нагрузкам. Изучение таких природных систем позволяет разрабатывать новые инженерные решения и применять их в промышленности.

Современные области применения функционально-градиентных материалов охватывают широкий спектр отраслей промышленности. В авиационно-космической технике они используются для создания элементов тепловой защиты, компонентов реактивных двигателей и других деталей, работающих в условиях высоких темпера-

тур. В автомобильной промышленности ФГМ применяются для изготовления деталей двигателей, трансмиссий и тормозных систем, где требуется высокая прочность и устойчивость к износу. В медицине такие материалы используются при создании имплантатов и протезов, поскольку их структура может быть адаптирована к особенностям человеческого организма. В настоящее время области применения ФГМ ограничены технологическими возможностями, однако их востребованность постоянно увеличивается, что активизирует поиск инновационных решений.

Аддитивные технологии обладают уникальным преимуществом перед традиционными методами получения градиентных материалов: они позволяют формировать изделие по заранее заданной компьютерной модели, управлять составом материала по траектории любой формы.

Одним из наиболее распространенных методов аддитивного производства является селективное лазерное плавление. Этот процесс заключается в последовательном расплавлении порошкового материала с помощью лазерного излучения и формировании изделия слой за слоем. Параметры процесса, такие как мощность лазера, скорость сканирования и толщина слоя, оказывают значительное влияние на структуру и свойства материала. Изменяя эти параметры, можно создавать изделия с различными характеристиками в разных зонах, формируя тем самым градиентные структуры.

Важную роль в разработке изделий из функционально-градиентных материалов играет численное моделирование. Методы компьютерного анализа позволяют прогнозировать поведение материалов под действием нагрузок и оптимизировать их структуру еще на этапе проектирования. Использование метода конечных элементов позволяет учитывать изменение свойств материала в различных частях конструкции и определять ее прочность и долговечность. Это значительно сокращает время разработки новых изделий и повышает их надежность.

На рис. 1 представлены результаты моделирования эксперимента на растяжение составного образца, различные части которого изготовлены при двух различных мощностях лазера и соответственно имеют различные механические свойства (предел текучести, модуль упругости).

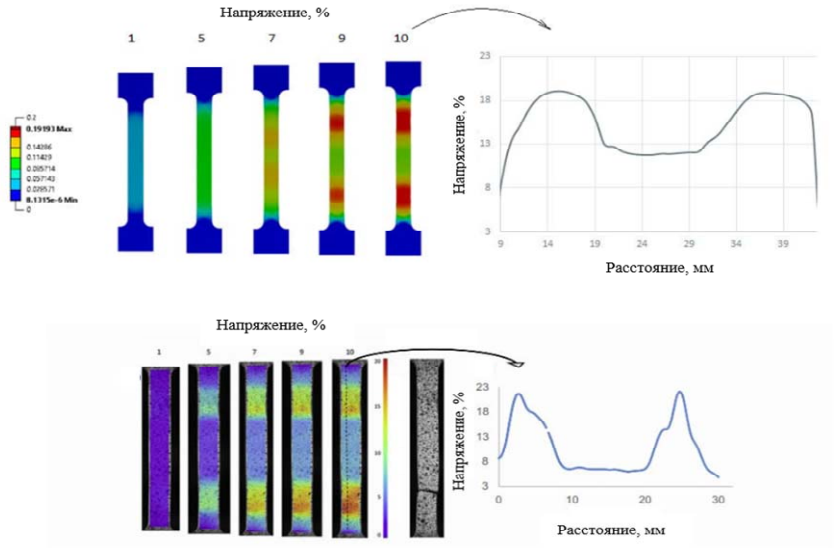


Рис. 1. Результаты моделирования градиентного образца

Примером практического применения численного моделирования является разработка протеза бедренного сустава с градиентной структурой, который соответствовал бы механическим свойствам бедренной кости. Поскольку протезы, изготовленные традиционными методами, сплошные по своей структуре, их жесткость по сравнению с жесткостью кости велика, что в процессе эксплуатации влечет за собой разрушение кости. Избежать подобных проблем позволит изготовление протеза с улучшенными механическими характеристиками. Использование функционально-градиентных материалов позволяет создавать протезы, механические свойства которых максимально приближены к свойствам кости. Это повышает срок службы изделия и снижает риск осложнений после имплантации. На рис. 2 показана разработанная модель протеза, она имеет градиентную плотность и соответствует механическим характеристикам обеих частей кости.

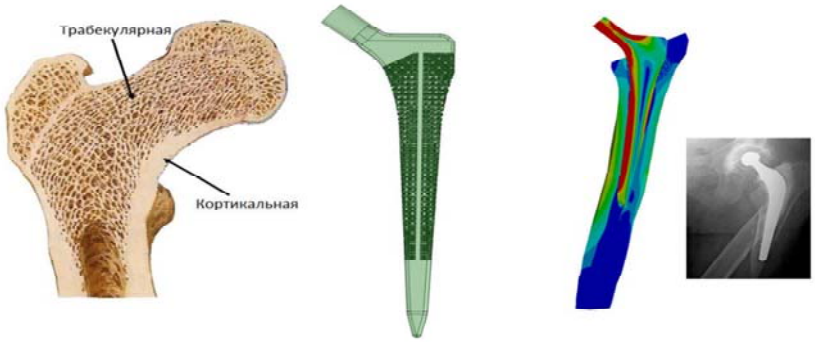


Рис. 2. Модель протеза

Аддитивные технологии позволяют управлять не только геометрией изделия, но и его внутренней структурой. Такой подход обеспечивает более равномерное распределение нагрузок, снижение массы конструкции и повышение ее надежности, а использование градиентных материалов способствует уменьшению расхода сырья и снижению затрат на производство.

К преимуществам аддитивных технологий с использованием ФГМ можно отнести кроме высокой точности изготовления изделий возможности создания сложных геометрических форм, снижения количества отходов, повышения эффективности использования материалов, а также возможность реализовывать специальные требования к создаваемому объекту в соответствии с условиями эксплуатации. Эти технологии позволяют ускорить внедрение инновационных решений в современную промышленность.

Таким образом, аддитивные технологии в сочетании с ФГМ являются перспективным направлением развития современной промышленности. Они обеспечивают создание изделий с заданными свойствами, повышают эффективность производства и открывают новые возможности для разработки инновационных материалов. В будущем ожидается дальнейшее расширение применения этих технологий в авиации, медицине, энергетике и других областях техники. Их внедрение позволит создавать более надежные, долговечные и экономичные конструкции, отвечающие требованиям современной промышленности.

Литературыа

1. Градиентные полимерные материалы / А. А. Аскадский, Л. М. Голенева, К. А. Бычко [и др.] // Обзор. журн. по химии. – 2012. – Т. 2, № 4. – С. 263–318.
2. Миньк, Д. В. Теория и практика получения функциональноградиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2020. – 450 с.

КРИОГЕННАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

А. О. Гуща

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

Научный руководитель Г. В. Петришин

Рассмотрены основные материалы осевого инструмента до и после криогенной обработки. Проанализированы разные методологии криогенной обработки в сравнении с другими обработками и в их комбинациях. Получены результаты сравнения и сделаны выводы о преимуществах и недостатках криогенной обработки для упрочнения осевого инструмента.

Ключевые слова: PVD-покрытие, криогенная обработка, износостойкость.

Более 30 % от общего объема продукции инструментального производства занимает осевой инструмент (сверла, зенкеры, развертки). В силу конструктивных особенностей такой инструмент является малопроизводительным и лимитирует производительность технологического процесса механической обработки деталей. Для синхронизации операций и обеспечения заданной производительности технолог вынужден интенсифицировать режимы резания осевого инструмента, что, в свою очередь, ведет к увеличению себестоимости обработки за счет преждевременного выхода из строя инструмента и увеличения доли времени на участившуюся смену инструмента.

Значительно повысить ресурс, стойкость и режущие свойства осевого инструмента можно технологическими способами за счет дополнительных операций: обработки в атмосфере сухого и перегретого пара, нанесением PVD-покрытий, криогенной обработки.

Обработка в атмосфере сухого и перегретого пара является простой, недорогой и безопасной операцией, способствующей повышению стойкости инструмента на 50–75 %. В результате такой обработки на поверхности инструмента образуется окисная пленка толщиной 2–5 мкм. Эта пленка защищает инструмент от коррозии, а также удерживает смазку, понижает коэффициент трения и препятствует свариванию стружки с инструментом при резании. Кроме того, обработка паром устраняет недоотпуск, полученный при комплексной термообработке, и снимает шлифовочные напряжения в инструменте.

В производстве осевого режущего инструмента из инструментальных сталей PVD-покрытия являются средством дополнительного повышения износостойкости за счет высокой твердости, низкого коэффициента трения, высокой химической устойчивости, повышения теплопроводности. Стойкость инструмента с PVD-покрытием повышается в 1,5–2 раза.

Повысить производительность, снизить себестоимость обработки и затраты на осевой инструмент позволяет упрочняющая криогенная обработка (КО). В ре-

зультате криогенного упрочнения повышается износостойкость за счет высокой и стабильной твердости, низкого коэффициента трения, повышения теплопроводности. Стойкость осевого инструмента из инструментальной стали с криогенным упрочнением повышается в 1,2–2 раза.

Увеличение стойкости сверл Р6М5 с криогенным упрочнением и без него при сверлении без СОЖ сохраняется и составляет 52 %.

Значения поправочного коэффициента K_{uv}, учитывающего влияние инструментального материала на скорость резания согласно зависимости

$$V_p = V_{\text{тб}} K_{mv} K_{nv} K_{uv}$$

могут быть дополнены для сталей 9ХС и Р6М5 с криогенной обработкой значениями, равными 0,8 и 1,23 (см. таблицу).

Значения коэффициента K_{uv} для различных инструментальных материалов

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал							
	Р6М5	Р6М5*	ВК4	ВК6	9ХС	9ХС*	ХВГ	У12А
Сталь, чугун, медные и алюминиевые сплавы	1	1,23	2,5	2,7	0,6	0,8	0,6	0,5

Примечание. *Материал после криогенной обработки.

Проведены исследования влияния операций нанесения PVD-покрытий и криогенного упрочнения на абразивную износостойкость образцов Ø 6 мм из сталей Р6М5 и 9ХС, используемых для производства осевого инструмента. Относительная размерная износостойкость исследуемых сталей, обработанных по различным технологическим схемам, приведена на рис. 1.

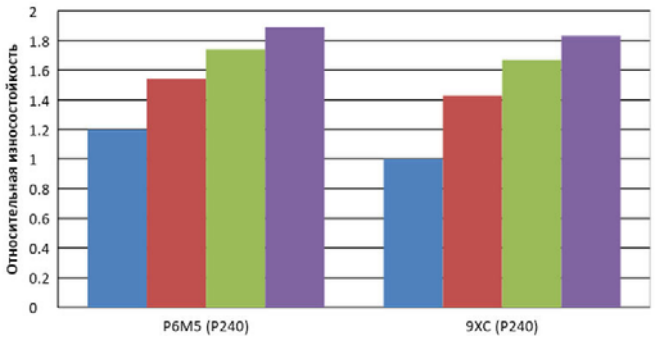


Рис. 1. Относительная износостойкость образцов из сталей Р6М5 и 9ХС, обработанных по различным технологическим схемам

Если принять за 1,0 износостойкость термообработанной стали 9ХС, то дополнительная криогенная обработка повышает размерную износостойкость на 43 %, что выше износостойкости термообработанной стали Р6М5. При этом стоимость инструментальной стали определенного сортамента Р6М5 составляет 11,3 руб./кг, что более, чем в 8 раз выше стоимости килограмма стали 9ХС. Таким образом, КО позволяет повысить стойкость и снизить затраты на осевой инструмент из стали 9ХС и Р6М5.

Для того чтобы инструмент из стали 9ХС мог конкурировать с инструментом из стали Р6М5 по производительности обработки отверстий, необходимо на него нанести PVD-покрытие. Наличие покрытия на инструменте из стали 9ХС позволяет назначать повышенные режимы резания в соответствии с составом покрытия. Дополнительная криогенная обработка инструмента из стали 9ХС с PVD-покрытием обеспечивает повышение стойкости до уровня, превышающего стойкость инструмента из стали Р6М5 с PVD-покрытием, что в конечном счете обеспечивает повышение производительности и стойкости, снижение себестоимости обработки и затрат на осевой инструмент.

Литература

1. Кокорин, Н. А. Термическая обработка при криогенных температурах / Н. А. Кокорин ; ООО «НПЦ «КриоТехРесурс». – Ижевск : Шелест, 2019. – 136 с. : ил.
2. Кокорин, Н. А. Стабилизация размеров и формы деталей криогенным воздействием / Н. А. Кокорин // РИТМ машиностроения. – 2020. – № 1. – С. 10–14.
3. Воробьев, В. Г. Термическая обработка стали при температуре ниже нуля / В. Г. Воробьев. – М. : Оборонгиз, 1954. – 306 с.
4. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов : учебник / Ю. М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1979. – 320 с.
5. Термическая обработка коррозионностойких сталей и сплавов на железоникелевой основе в химическом машиностроении : СТП 26.260.484-2004.
6. Кокорин, Н. А. Криогенное упрочнени – гарантия оптимизации инструмента / Н. А. Кокорин // РИТМ машиностроения. – 2018. – № 4. – С. 80–84.
7. Использование криогенной обработки для повышения износостойкости профилегибочных валков / А. В. Колобов, М. А. Соминин, С. В. Плеханов [и др.] // Металлург. – 2017. – № 6. – С. 86–90.
8. Криогенное упрочнение для повышения эффективности технологий обработки инструмента из стали Х12МФ / Ю. О. Михайлов, Н. А. Кокорин, В. В. Тарасов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2017. – № 4. – С. 23–25.
9. Строение и свойства авиационных материалов : учеб. для вузов / А. Ф. Белов, Г. П. Бенедиктова, А. С. Висков [и др.]. – М. : Металлургия, 1989. – 368 с.
10. Гуляев, А. П. Инструментальные стали : справочник / А. П. Гуляев, К. А. Малинина, С. М. Саверина. – М. : Машиностроение, 1975. – 272 с.
11. Исследование абразивной износостойкости серого чугуна с криогенным упрочнением / В. В. Тарасов, И. А. Данилов, Н. А. Кокорин [и др.] // Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов / В. В. Тарасов, И. А. Данилов, Н. А. Кокорин [и др.]. – Ижевск : ИМ УрО РАН, 2015. – С. 190–198.
12. Данилов, И. А. Повышение абразивной износостойкости чугуна криогенным воздействием / И. А. Данилов, Н. А. Кокорин, М. С. Кондратенков // Литейное производство. – 2015. – № 12. – С. 7–10.
13. Кокорин, Н. А. Оптимизация инструмента криогенным воздействием / Н. А. Кокорин // Промышленные страницы Сибири. – 2019. – № 10. – С. 60–63

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ НА ЗОЛЬНОСТЬ ВЫЖИГАЕМОЙ МОДЕЛИ

А. Д. Левкина

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Исследована FDM-печать выжигаемой модели для литья детали «Вилка». Ключевой параметр – зольность, зависящая от выбора полимера и параметров печати. Проведено сравнение пластиков REC CAST, PolyCast и PLA, которое показало, что PLA оптимален: золь-

ность – 0,003 %, полное выгорание – при 500 °С. Установленные параметры печати: горизонтальная ориентация модели при 3D-печати, заполнение «зигзаг» полностью – 8 % (обеспечивает массу модели 46 г и исключает деформацию при нагрузке давлением 100 Н · м², весом смеси 3 кПа), время печати – 2 ч 27 мин.

Ключевые слова: 3D-печать, выжигаемая модель, зольность, параметры печати.

В данной работе объектом исследования является 3D-модель детали «Вилка», созданная в программе SolidWorks2020 на основе чертежа детали. Основным методом изготовления детали является литье, обеспечивающее высокие точность исполнения поверхности и повторяемость детали, а также ее изготовление в большом количестве. Однако у данного метода есть ряд недостатков: сложность, дороговизна и длительность изготовления литейной оснастки, отладка процесса, которая также занимает много времени и требует лишних расходов материалов. В современном обществе время и стоимость для заказчика являются важными и решающими критериями. Для устранения возникающих при производстве недостатков можно использовать метод литья по выжигаемым моделям, где сами модели производятся при помощи 3D-печати по технологии FDM (послойное наложение филамента), которая позволяет создать деталь любой геометрической формы за короткий промежуток времени без потери качества и перерасхода материала.

Для изготовления детали подобным методом ключевым параметром является зольность – количество неорганического остатка, образующегося после сжигания полимерной модели. Зольность напрямую влияет на качество отливки: высокий процент золы может привести к дефектам поверхности, ухудшению механических свойств и увеличению брака. Поэтому нужно учитывать несколько факторов: выбор правильного материала и параметры, выставляемые при печати. Целью работы является определение зольности выжигаемой модели в зависимости от ее материалов и параметров.

Зольность пластика зависит, в первую очередь, от его химического состава: органическая оставляющая пластика (базовая углеводородная цепь) дает наименьшее количество золы. Усложнение ее структуры (внедрение ароматических колец, силиконов или галогенов) и добавление неорганических соединений (металлы в составе катализаторов, добавки для окрашивания, упрочнители и т. д.) значительно повышает процентное содержание твердых остатков после горения. Также важно, на какие мономолекулы и простые соединения полимер распадается при нагреве: многие звенья склонны к перекрестному скрещиванию при распаде. В итоге образуются дополнительные неорганические соединения, которые начинают тлеть, образуя высокое содержание золы.

Для создания выжигаемых моделей выделяют ряд специальных полимеров, которые больше всего подходят по упомянутым выше свойствам: REC CAST, PolyCast, PLA (см. таблицу) [1].

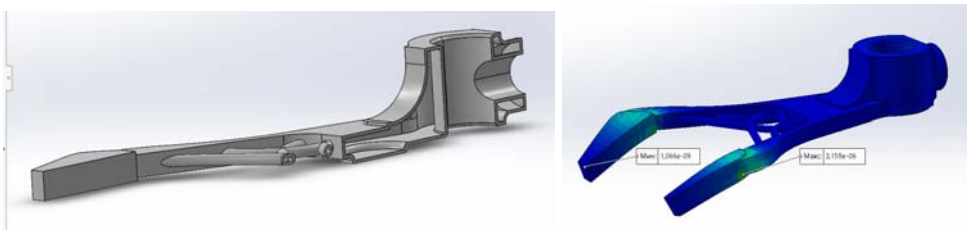
Исходя из приведенных данных можно сделать вывод о том, что PLA пластик обладает наилучшей для горения химической основой (сгорает без остатка), практически не нуждается в химических добавках, нетребователен к условиям горения и, как следствие, имеет наименьшее значение зольности из предложенных материалов. Учитывая эти сведения, было принято решение произвести деталь именно из этого материала.

Параметры выжигаемых полимеров

Параметр	Полимер		
	REC CAST	**PolyCast**	**PLA**
Химическая основа	Полиметилметакрилат (PMMA)	Поливинилбутираль (PVB)	Полимолочная кислота
Используемые добавки	Пластификаторы, антипирены, стабилизаторы (тальк), упрочнители (медный порошок)	Примеси и загрязнения (остатки других соединений после получения)	Биосовместимые добавки
Условия горения и тления	Горит при *t* 400–450 °C только при условии хорошей аэрации, при низкой температуре нагрева склонен образовывать маслянистые олигомеры	Выгорает при *t* 600–700 °C, тлеет при низкой температуре нагрева, недостатке кислорода или быстрой скорости нагрева	Выгорает при *t* 500 °C, тлеет при низкой температуре нагрева и недостатке кислорода
Процент зольности	0,01 %	От 0,003 до 0,006 %	0,003 %

Зольность зависит не только от пластика, его химического состава, но и от выставляемых параметров печати: расположение изделия при печати, плотность и шаблон заполнения, процент перекрытия. Задание программы печати происходит в программе UltimakerCura 5.4.0.

Чем меньше материала используется при печати модели, тем меньший коэффициент зольности будет в итоге. Идеальным вариантом заполнения считается каркасное (пустотелое). Однако, учитывая специфику производства, нужно брать в расчет нагрузку, которая будет оказана на модель при ручном формовании в песчано-глинистою форму: давление при уплотнении составляет 100 $Н \cdot м^2$, вес самой смеси (также давление на модель) – 3 кПа. При нагрузке каркасной модели с толщиной стенки 1 мм – минимальная допустимая толщина слоя экструзии (рис. 1, *а*), происходит значительная деформация изделия при формовке, которую нельзя допустить (рис. 1, *б*).

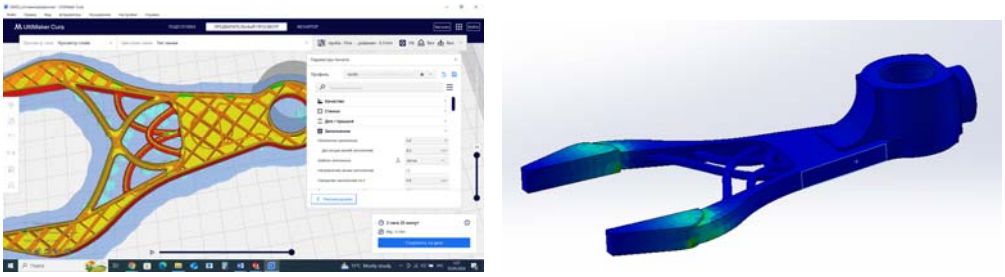


а) *б*)

Рис. 1. Нагружение модели:
а – разрез нагружаемой детали; *б* – деформация при нагружении

Оптимальное решение, не требующее использования большого количества материала, – построение внутренних ребер жесткости, которые можно расположить несколькими способами: восьмигранники, зигзаг, крестовое, сетка, гироид. Заполнение зигзагом является самым простым и быстрым для печати. При использовании такого шаблона возможность провисания материала при построении верхних слоев и лишнего материала внутри модели минимальна. Наилучшее отображение внутреннего заполнения можно получить на 55-м слое печати (рис. 2, *а*).

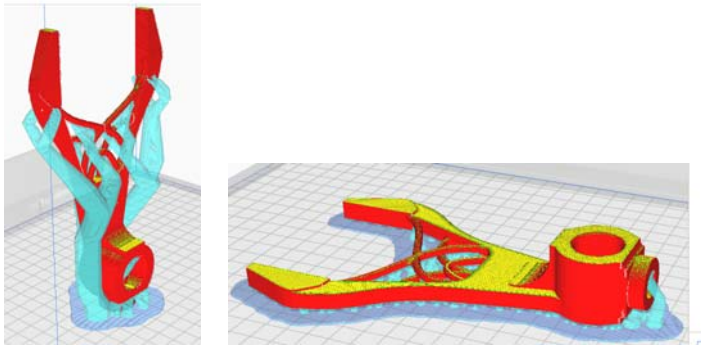
При выборе плотности заполнения нужно обращать внимание: чем ниже плотность, тем ниже масса модели и тем меньше процент зольности. При минимальном допустимом заполнении 5 % связанный с этим параметр дистанции линии равен 8 мм, а масса детали составляет 47 г; при проценте заполнения 6 (7) % значение дистанции будет дробным; при 8 % заполнения значение дистанции равно 5 %, а масса модели составляет 46 г [2]. При нагрузке детали с заполнением 8 % деформации не происходит (рис. 2, *б*).



а) *б*)

Рис. 2. Нагружение модели:
а – шаблон и плотность заполнения; *б* – нагружение модели с заполнением

От расположения детали при печати зависят время печати, количество поддержек и конечная масса изделия. Если расположить деталь вертикально (рис. 3, *а*), то итоговая масса модели составит 48 г, а время печати – 3 ч 4 мин. Если расположить деталь горизонтально (рис. 3, *б*), то итоговая масса модели составит 46 г, а время печати – 2 ч 27 мин.



а) *б*)

Рис. 3. Расположение модели при печати:
а – вертикально; *б* – горизонтально

Таким образом, для литья по выжигаемым моделям оптимален PLA-пластик: он дает минимальную зольность (0,003 %) и полностью выгорает при 500 °С. Деталь «Вилка» из PLA пластика печатают горизонтально с заполнением «зигзаг» плотности 8 % (масса – 46 г, время печати – 2 ч 27 мин), что предотвращает деформацию при формовке и снижает твердый остаток.

Литература

1. Битюцкий, А. Д. Выбор материала для трехмерной печати моделей в ювелирном и художественном литье / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Прогрессивные литейные технологии : тр. X Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 9–13 нояб. 2020 г. – М., 2020. – С. 404–408. – EDN NKTRHL.
2. Аддитивные технологии. Современные методы 3D-печати : учеб.-метод. пособие для обучающихся по направлениям подготовки: 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.04 «Программная инженерия»; 27.03.03 «Системный анализ и управление»; 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» / С. Г. Менюк, В. В. Дядичев, Г. Р. Биленко, Д. С. Менюк. – Симферополь : Ариал, 2024. – 114 с. – EDN WGBJIM.

АНАЛИЗ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТЫХ ФИЛЬТРОВ

И. В. Селюков

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Рассмотрены принципы построения градиентных фильтров с пространственно-изменяемой структурой пор, обеспечивающих высокую эффективность очистки и увеличенный ресурс работы. Проведен анализ полимерных, металлических и керамических материалов. Предложен подход к созданию градиентных материалов на основе бентонитовой глины, дисперсных отходов (металлургический шлака, боя фарфора).

Фильтрационные материалы играют важную роль в химической промышленности, биотехнологии, медицине, системах очистки воды и газов. Одним из наиболее эффективных типов фильтров являются градиентные фильтры, обладающие пространственно изменяемой структурой пор. Такие фильтры представляют собой многослойные пористые материалы, в которых размер пор постепенно уменьшается по направлению движения фильтруемой среды. Реализация концепции градиентных структур с закономерно изменяемым размером пор в пространстве обеспечивает распределение задерживаемых частиц по всему объему и кратно увеличивает ресурс работы при сохранении тонкости очистки. В отличие от традиционных фильтров с однородной пористостью градиентные конструкции позволяют минимизировать перепад давления на фильтре при сохранении высокой удерживающей способности.

Процесс фильтрации начинается с прохождения жидкости или газа через первый слой фильтра, имеющий наиболее крупные поры. Этот слой выполняет функцию предварительной очистки и задерживает крупные частицы загрязнений, такие как механические примеси, пыль и крупные агрегаты молекул. Далее поток проходит через второй слой с меньшим размером пор, где задерживаются частицы среднего размера. Последний слой фильтра имеет наиболее мелкие поры и предназначен для задержания самых маленьких частиц, включая микроорганизмы и мелкодисперсные примеси. Современные требования к фильтрации, например, в системах топливоподачи высокого

давления, предполагают улавливание частиц размером менее 4 мкн. При этом градиентный профиль позволяет достичь ресурса работы, в 2–3 раза превышающего ресурс однослойных аналогов при одинаковой тонкости очистки.

Особое место занимают полимерные нановолокнистые композиты с контролируемым градиентом. Среднегеометрический диаметр волокон такого слоя должен находиться в диапазоне от 100 нм до 1 мкн, а коэффициент градиентности должен составлять от 1,1 до 2,8. Номенклатура полимерных материалов включает полиамиды, полиэфиры, полисульфоны, полипропилен и фторполимеры. Оптимальные характеристики достигаются при использовании композитных фильтрующих материалов с нановолокнистым слоем [1].

Среднегеометрический диаметр волокон такого слоя должен находиться в диапазоне от 100 нм до 1 мкн, а коэффициент градиентности должен составлять от 1,1 до 2,8. Номенклатура полимерных материалов включает полиамиды, полиэфиры, полисульфоны, полипропилен и фторполимеры.

Для более жестких условий эксплуатации применяются металлические градиентные материалы, получаемые методами порошковой металлургии. В таких структурах формируется высокопористая подложка с последующим нанесением тонких слоев с меньшим размером пор.

В работе предложен метод борьбы с микропластиком путем очистки воды с использованием градиентных фильтров.

Градиентный материал получается путем нанесения слоев определенной фракции дисперсности друг на друга (по снижению дисперсности). Затем материал подвергается спеканию. Такой профиль обеспечивает постепенное уменьшение пор по направлению от поверхности (рис. 1).

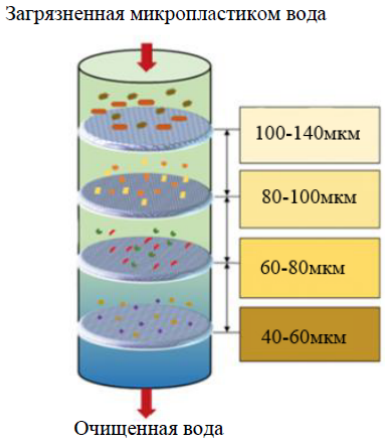


Рис. 1. Схема фильтра с градиентом пористости

Для получения таких фильтров использовалась бентонитовая глина, дисперсные металлургический шлак и бой готового фарфора. Материалы подвергались диспергированию при помощи планетарной мельницы с целью получения необходимых узких размерных фракций (например: 40–60 мкм; 60–100 мкм; 100–140 мкм). После диспергирования в планетарной мельнице полученные порошки разделяли на фракции с использованием классификатора. Это позволило сформировать слои фильтра с заданным размером частиц в каждом слое и соответственно – контролируемой пористостью [2].

а) *б*)

Рис. 2. Общий вид:
а – планетарная мельница; *б* – классификатор

Аддитивные технологии принципиально меняют подход к проектированию фильтров. Благодаря послойному синтезу изделия становится возможным проектировать внутреннюю структуру фильтра с высокой точностью, создавать поры определенных размеров и получать градиент пористости с высокой воспроизводимостью.

Классификация методов аддитивного производства градиентных фильтров представляет особый научный интерес, так как именно способ формирования слоев определяет точность воспроизведения пористой структуры, механические свойства изделия и область его практического применения.

Для поставленной цели можно выделить следующие методы получения фильтров:

• Экструзионные методы (FDM/FFF) являются наиболее доступными и широко распространенными в современной практике аддитивного производства.

Для получения градиентных фильтров данный метод особенно удобен благодаря возможности изменять расстояние между соседними нитями материала, толщину слоя, скорость подачи и температуру экструдера. За счет этого можно целенаправленно управлять размером внутренних каналов и пор. Например, в верхних слоях фильтра может использоваться более редкая укладка нитей, что формирует крупные поры для предварительной фильтрации. По мере продвижения к нижним слоям плотность структуры увеличивается, а размеры пор уменьшаются, формируя выраженный градиент.

Преимуществами метода являются низкая стоимость оборудования, простота моделирования и возможность быстрого изготовления экспериментальных образцов. Однако точность формирования микропор ограничена диаметром сопла и реологическими свойствами полимера.

• Фотополимеризационные методы (SLA/DLP) основаны на послойном отверждении жидкой фотополимерной смолы под действием ультрафиолетового излучения. Данные методы обеспечивают значительно более высокую точность по сравнению с экструзионной печатью. Это особенно важно для изготовления микрофильтрационных и мембранных структур, где размер пор может составлять десятки микрометров. Использование SLA и DLP позволяет формировать сложные пространственные каналы, тонкие перегородки и высокоточные ячеистые структуры. Благодаря этому возможно получение фильтров для медицинских, биотехнологических и лабораторных применений.

• Порошковые методы (SLS/SLM) являются наиболее перспективными для изготовления металлических и керамических градиентных фильтров. Принцип работы основан на селективном лазерном спекании или плавлении порошкового материала.

В качестве исходного сырья используются металлические, керамические или полимерные порошки различной дисперсности.

Градиент пористости достигается несколькими способами: изменением мощности лазера; изменением скорости сканирования; использованием порошков разной дисперсности; варьированием толщины наносимого слоя. Этот метод особенно важен для создания фильтров, работающих при высоких температурах, давлениях и в агрессивных средах.

Фильтры, изготовленные методом SLS/SLM, обладают высокой механической прочностью, термостойкостью и длительным сроком службы, что делает их востребованными в химической промышленности, энергетике и машиностроении.

• Струйные методы (PolyJet/MultiJet) основаны на послойном нанесении жидкого материала микрокаплями с последующим отверждением. Главным преимуществом данных технологий является возможность одновременного использования нескольких материалов с различными физико-химическими свойствами. Это особенно важно при создании композиционных градиентных фильтров, где один слой должен обладать высокой механической прочностью, а другой – селективными фильтрационными свойствами.

Подобный подход позволяет получать многофункциональные фильтрующие системы с заданными зонами жесткости, пористости и химической устойчивости.

Таким образом, выбор аддитивного производства основывался на достижении определения точности размеров и форм пор при применении данного материала.

Литература

1. Деформация конденсата при формовании и активированное спекание сферических порошков при получении пористых материалов / П. А. Витязь, В. Н. Ковалевский, А. В. Ковалевская [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 2. – С. 139–145.
2. Горовцова, В. В. Исследование возможности получения градиентных фильтров / В. В. Горовцова // МИТРо 2025 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : материалы докл. науч.-техн. конф., Гомель, 5 дек. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2025. – С. 63–65.

ТЕПЛОПОТЕРИ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ РАСПЛАВА В ПОЛЕТЕ К МИШЕНИ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

Т. Д. Стасенко, В. Ю. Процко

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Приведен качественный анализ влияния теплопотерь капельной фазы расплава в полете к мишени при газотермическом напылении. Установлено, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов – их геометрических размеров, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, физико-химических свойств. Уменьшение размера капель расплава ведет к росту скорости охлаждения с одновременным уменьшением времени охлаждения и затвердевания частиц [1].

Ключевые слова: расплав, теплоотвод, конвекция, излучение, температура, тепловая энергия.

За время полета капли через газ одновременно происходит перенос количества движения и теплоты. Поэтому для расчета кинетики выделяемой теплоты и пробега капли необходимо решить серию дифференциальных уравнений теплопереноса и изме-

нения скорости для сферической частицы. При движении капля охлаждается. Продолжительность охлаждения капель расплава до начала процесса кристаллизации определяется как время, требуемое для выделения частицей теплоты перегрева $Q_{\text{пер}}$.

Потери частицей тепловой энергии за бесконечно малое время Δt_i составляют:

$$Q_{Ti} = \pi d_c^2 \left[a_i \left(T_i - T_{\text{г}} \right) + \varepsilon C_0 \left(T_i^4 - T_{\text{ст}}^4 \right) \right] \Delta t_i, \tag{1}$$

где a_i – коэффициент теплоотдачи; T_i – температура частицы в момент времени Δt_i; $T_{\text{г}}$ – температура газа; ε – степень черноты; C_0 – универсальная постоянная Стефана-Больцмана; $T_{\text{ст}}$ – температура стенки камеры.

Из условия теплового баланса на стадии отвода тепла перегрева:

$$Q_T - \sum_{i=1}^{n} Q_{Ti} = 0 \tag{2}$$

можно определить время охлаждения частиц до начала кристаллизации:

$$\tau_{\text{охл}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i. \tag{3}$$

При расчетах Δt_i необходимо учитывать то обстоятельство, что значение коэффициента теплоотдачи a_i в уравнении (1) изменяются во времени. Мгновенное значение a_i в процессе движения частиц можно рассчитать по известной формуле [2]:

$$a_i = \frac{Nu_i \lambda_{\text{г}}}{d_c}, \tag{4}$$

где $\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности среды; $Nu = 2 + 0{,}6\,\text{Pr}^{1/3}\, Re^{0{,}5}$ – число Нуссельта; $Pr = (\mu_{\text{г}} Cp_{\text{г}}) / \lambda_{\text{г}}$ – число Прандтля; $Cp_{\text{г}}$ – удельная теплоемкость среды; Re – число Рейнольдса. При определении числа Re_i авторами [3] используется зависимость:

$$Re_i = \frac{\pi d_c \rho_2 \left[\left(V_{\text{г}xi} + V_{\text{г}i} \right)^2 + V_{\text{г}yi}^2 \right]^{0{,}5}}{2\mu_{\text{г}}}, \tag{5}$$

где $V_{\text{г}x}$, $V_{\text{г}y}$ – горизонтальная и вертикальная координаты частицы; $V_{\text{г}}$ – скорость встречного потока газа; $\rho_{\text{г}}$ – плотность среды. При значениях $V_{\text{г}i} \neq 0$ выражение (5) позволяет оценивать условия движения и теплообмена частиц при противотоке газа.

Время полной кристаллизации определяется как сумма времени, необходимого для выделения частицей теплоты перегрева и времени кристаллизации расплава:

$$\tau_{\text{кр}} = \tau_{\text{охл}} + \sum_{i=1}^{k} \Delta t_{i\text{кр}}. \tag{6}.$$

Скорость охлаждения частицы в жидком или твердом состоянии находится из условия равенства изменения энтальпии $d(\Delta H)$ и теплоты, которая отводится от сферической частицы конвекцией и излучением $dQ_т$. Последняя находится дифференцированием уравнения (1) по времени.

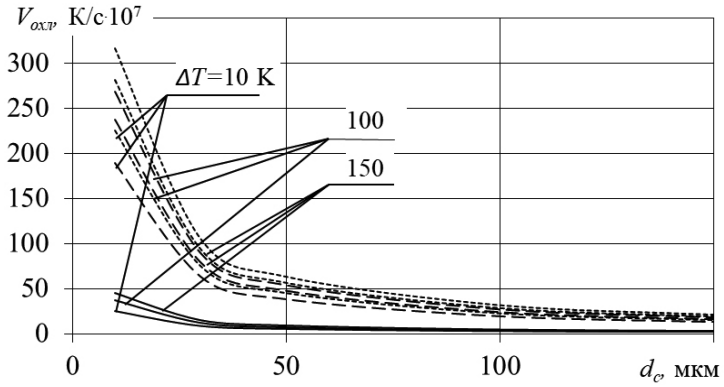


Рис. 1. Зависимость скорости охлаждения частицы в зависимости от ее диаметра при различных значениях температуры нагрева расплава ΔT:
—— – бронза (Бр.ОФ10-1); – - – сталь У8; · · · – нержавеющая сталь (12Х18Н10)

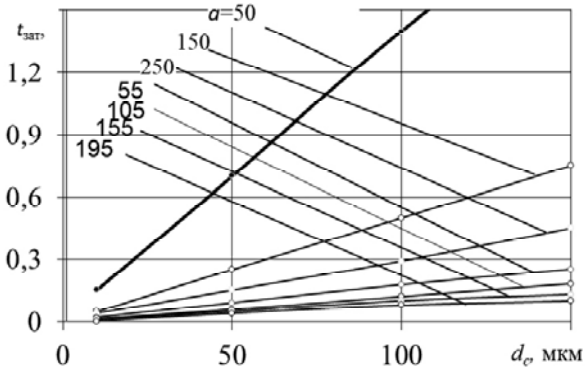


Рис. 2. Изменение времени затвердевания частицы стали У8 в зависимости от ее диаметра при различных значениях коэффициента теплоотвода конвекцией

Изменение энтальпии определяется из выражения

$$d(\Delta H) = Cp_г m_ч dT_i, \tag{7}$$

где $Cp_г$ – удельная теплоемкость газа; $m_ч$ – масса частицы; dT_i – изменение температуры частицы.

Условие $d(\Delta H) = dQ_т$ выполняется при условии $Hi < 0{,}1$, где Hi – критерий Хинзе–Мильборна.

Это позволяет определить скорость охлаждения частицы [4]:

$$V_{охл} = \frac{d\dot{T}_i}{dt} = \frac{6a(T_i - T_г) + 6\varepsilon C_0\left(T_i^4 - T_{СТ}^4\right)}{Cp_г \rho_l d_c}. \tag{8}$$

Из полученного выражения (8) видно, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов, таких как геометрические размеры капель расплава, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, свойств распыляемого материала и других, что иллюстрируется графическими зависимостями, представленными на рис. 1, 2. Из рис. 1 видно, что потери теплочастицы наиболее интенсивно происходит при их диаметре менее 50 мкм, а при больших диаметрах изменение скорости охлаждения имеет линейно-затухающий характер. Из рис. 2 видно, что изменение температуры капель расплава зависит от их размеров и имеет линейно-возрастающий характер.

Установлено, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов: их геометрических размеров, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, физико-химических свойств. Уменьшение размера капель расплава после диспергирования ведет к росту скорости охлаждения с одновременным уменьшением времени охлаждения и затвердевания получаемых частиц.

Литература

1. Стасенко, Д. Л. Особенности центробежного диспергирования капельной фазы расплава / Д. Л. Стасенко // Материалы, технологии, инструменты. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 55–58.
2. Стасенко, Д. Л. Анализ влияния теплоотвода при вторичном диспергировании капельной фазы расплава на структуру и микротвердость получаемых металлических порошков / Д. Л. Стасенко, И. Н. Степанкин // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 86–90.
3. Жаров, М. В. Исследование закономерностей процесса охлаждения и кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов в водной среде / М. В. Жаров // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т. 64, № 6. – С. 4–16.
4. Зверева, Е. Н. Оценка переменной интенсивности отвода теплоты от поверхности падающих и кристаллизующихся капель расплавов в процессе их приллирования / Е. Н. Зверева, Ю. А. Таран // Теоретические основы химической технологии – 2017 – Т 12, № 1. – С. 45–49.

ФОТОПОЛИМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Е. А. Гавриленко

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

Научные руководители: И. Н. Прусенко, И. Б. Одарченко

Представлены исследования влияния химического состава фотополимерных смол, геометрии образцов и температурного режима прокалки на зольность моделей, полученных методом 3D-печати, для литья по выплавляемым моделям. Показано, что снижение отношения площади поверхности к объему образцов и их ускоренный нагрев увеличивают коксовый остаток за счет диффузионных ограничений и неполного дожигания углеродистых фракций. Установлено, что оптимизация температурного профиля прокалки обеспечивает снижение зольности и повышения точности литейных процессов.

Ключевые слова: 3D-печать, VAT-полимеризация, SLA, MSLA, фотополимеры, литье по выплавляемым моделям, зольность.

Современные возможности фотополимерной 3D-печати (VAT-полимеризация) все больше применяются в литейном производстве и являются перспективным инструментом повышения точности и эффективности литейных процессов. Основной

областью применения данной технологии в литейном производстве, как правило, является изготовление мастер-моделей для технологии литья по выплавляемым моделям (ЛВМ), а также изготовление элементов технологической оснастки, шаблонов, вставок в модельные плиты. В отличие от традиционных методов изготовления мастер-моделей для ЛВМ фотополимеризация обеспечивает высокую размерную точность, минимальную шероховатость поверхности (*Ra* – 3,2 мкм) и возможность создания сложных геометрических элементов, включая внутренние каналы и тонкостенные структуры.

Известно, что фотополимеризация основана на инициировании радикальной или катионной полимеризации под воздействием света определенной длины волны. Данная технология включает стадии поглощения фотонов инициатором, генерации активных радикалов, роста цепи, формирования трехмерной сетки и последующего пост отверждения. Радикальная фотополимеризация, широко применяемая в технологиях VAT-полимеризации (SLA, MSLA, DLP), обеспечивает высокую скорость отверждения, однако чувствительна к кислороду и может приводить к неоднородности структуры при недостаточной экспозиции. Катионная фотополимеризация, напротив, менее подвержена ингибированию кислородом, но требует более сложных инициаторов и обладает меньшей скоростью [1]. Сравнение механизмов фотополимеризации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение радикальной и катионной фотополимеризации

Параметр	**Радикальная фотополимеризация**	**Катионная фотополимеризация**
Тип мономеров	Акрилаты	Эпоксиды
Усадка	3–6 %	0,5–2 %
Температура стеклования	50–90 °C	120–180 °C
Чувствительность к кислороду	Высокая	Отсутствует
Остаточные напряжения	Значительные	Низкие

Данные различия являются основой для выбора смолы под конкретную технологическую задачу литейного производства. В ювелирном производстве, где важна детализация (элементы с минимальным размером 0,1–0,2 мм), акрилаты остаются доминирующими. В ответственных инженерных конструкциях чаще используются эпоксидные составы.

Современные 3D-принтеры и фотополимерные материалы позволяют обеспечивать размерную точность до ± 0,05 мм к номинальному размеру, что значительно превосходит традиционные методы изготовления восковых моделей. Однако фотополимеры обладают, как правило, более высокой зольностью по сравнению с инжекционным воском, что требует тщательного выбора материала и оптимизации режима выжигания.

Для исследования зольности фотополимерных материалов разработано четыре типа образцов одинакового объема, массы, с различной площадью поверхности (табл. 2).

Таблица 2

Геометрические параметры экспериментальных образцов

Геометрическая форма	*S*, см²	*V*, см³	*S*/*V*, см²/ см³	Масса, г
Куб 20 × 20 × 20 мм	24	8	3	9
Пластина 40 × 40 × 5 мм	40	8	5	9
Перфорированная пластина	56	8	7	9
Оболочка 40 × 40 × 11 мм, S = 2 мм	80	8	10	9

Экспериментальное определение зольности проводилось на трех марках литейных фотополимерных смол: Formlabs Castable Wax, HARZ Labs Dental Cast Cherry PRO, Formlabs Black Resin. Для всех материалов применялся единый подход, обеспечивающий сопоставимость результатов и минимизацию влияния внешних факторов. Прокаливание осуществлялось в печи сопротивления в двух режимах: эштрих-режим (плавный, ступенчатый нагрев) и ускоренный режим. Такой подход обеспечил формирование различных условий реального выжигания моделей в полости литейной формы.

В эштрих-режиме использовался ступенчатый нагрев, чтобы разделить стадии испарения, пиролиза и дожигания остатка. Сначала осуществлялся подъем температуры до 149 °С со скоростью около 20 °С/мин и выдержка 60 мин для удаления влаги и низкомолекулярных фракций; затем подъем до 371 °С с выдержкой 60 мин – стадия активной деструкции связующего и начала выгорания органических компонентов; далее подъем до 482 °С с выдержкой 60 мин для завершения пиролиза и дожигания основной массы органической матрицы; после этого подъем до температуры 732 °С с выдержкой 60 мин для полного окисления остаточного углерода и перевода неорганических компонентов в устойчивые оксидные формы. Такой режим создает условия для полного и контролируемого выгорания органической составляющей.

В ускоренном режиме термическое разложение образцов проводилось без ступенчатого нагрева. Образцы помещались в камерную печь сопротивления, в которой происходил нагрев до температуры 732 °С со скоростью около 80 °С/мин. После достижения данной температуры осуществлялась изотермическая выдержка продолжительностью 60 мин, обеспечивавшая завершение процессов пиролиза и окисления остаточного углерода. По окончании выдержки образцы охлаждались совместно с печью до температуры окружающей среды.

Навески массой 9 г взвешивали на лабораторных аналитических весах. Количество коксового остатка определяли по изменению массы навески до и после прокаливания, производили расчет зольности (табл. 3). Каждый эксперимент повторен 5 раз, приведены средние значения.

Проведенное исследование показало, что величина зольности фотополимерных смол определяется сочетанием химического состава, геометрии образца и температурного режима прокалки (с учетом полного выгорания органической матрицы). Для всех материалов установлено, что уменьшение отношения площади поверхности к их объему приводит к росту коксового остатка. При переходе от $S/V = 10$ к S/V = 3 зольность увеличивается с 0,012 до 0,037 % для Formlabs Castable Wax V1, с 0,03 до 0,085 % – для HARZ Labs Dental Cast Cherry PRO и с 0,18 до 0,41 % –

для Formlabs Black Resin. Рост зольности (в 2–3 раза) при уменьшении удельной поверхности связан с тем, что в массивных образцах кислород проникает вглубь значительно хуже, вследствие чего пиролиз протекает преимущественно в условиях ограниченного окисления и сопровождается усиленным образованием углеродистого остатка.

Таблица 3

Зольность исследованных смол при прокаливании

Смола	*S*/*V*	Formlabs Castable Wax V1, %		HARZ Labs Dental Cast Cherry PRO, %		Formlabs Black Resin, %	
		Эштрих-режим	Ускоренный режим	Эштрих-режим	Ускоренный режим	Эштрих-режим	Ускоренный режим
Куб 20 × 20 × 20 мм	3	0,037	0,071	0,085	0,125	0,41	0,552
Пластина 40 × 40 × 5 мм	5	0,025	0,04	0,065	0,095	0,3	0,43
Перфорированная пластина	7	0,018	0,029	0,045	0,075	0,23	0,34
Оболочка 40 × 40 × 11 мм, S = 2 мм	10	0,012	0,017	0,03	0,055	0,18	0,28

Сравнение исследованных материалов показало, что Formlabs Black Resin обладает наибольшей зольностью, достигающей 0,552 % в ускоренном режиме и 0,41 % – при ступенчатом нагреве. Повышенный остаток обусловлен высокой степенью сшивки полимерной матрицы, значительным содержанием пигментов и неорганических наполнителей, которые формируют устойчивый остаток после термического разложения. Литейные фотополимеры Castable Wax V1 и Dental Cast Cherry PRO характеризуются меньшей долей неорганических компонентов (в случае Castable Wax V1, наличием восковой фракции), и обеспечивают более низкую зольность – от 0,012 до 0,125 %. Это подтверждает их соответствие технологическим требованиям литья по выплавляемым моделям, где критически важна минимизация твердого остатка после прокалки.

Температурный режим прокалки оказывает значительное влияние на величину остатка. Быстрый нагрев до 732 °C со скоростью около 80 °C/мин приводит к увеличению зольности всех материалов: для Castable Wax V1 рост составляет от 0,037 до 0,071 %, для Cherry PRO – от 0,085 до 0,125 %, для Black Resin – от 0,410 до 0,552 %. Увеличение остатка на 40–90 % по сравнению со ступенчатым режимом связано с формированием выраженных температурных градиентов, локальным перегревом поверхностных слоев и задержкой прогрева внутренних областей, что способствует образованию более плотного пироуглеродного слоя и частичному переходу неорганических компонентов в устойчивые оксидные формы. При ступенчатом эштрих-режиме термическое разложение протекает последовательно через стадии удаления летучих компонентов, пиролиза и окислительного дожигания, что позволяет достичь минимальной зольности, ограниченной исключительно составом материала.

Таким образом, оптимизация температурного профиля прокалки является ключевым фактором для снижения зольности фотополимерных материалов. Литейные

акрилатные и воскомодифицированные смолы демонстрируют наилучшие показатели при использовании ступенчатого режима нагрева, тогда как наполненные технические акрилаты, такие как Formlabs Black Resin, требуют более строгого контроля температурных условий из-за высокой склонности к образованию невыгораемого остатка.

Литература

1. Fouassier, J. P. Photoinitiators for Polymer Synthesis: Scope, Reactivity and Efficiency / J. P. Fouassier, J. Lalevée. – Wiley-VCH, 2012. – 491 p.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ FDM-ПЕЧАТИ ОСНАСТКИ: СТАНДАРТЫ КАЧЕСТВА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

К. Д. Лапицкий

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

Научные руководители: И. Б. Одарченко, И. Н. Прусенко

Произведен анализ механических свойств, нормативной документации современных полимеров, применяемых в FDM-печати для изготовления элементов литейной оснастки. Предложена методика испытаний полимерных материалов на абразивный износ, адаптированная к реальным условиям литейного производства.

Ключевые слова: FDM-печать, абразивная стойкость, износ, литейная оснастка.

Современное развитие аддитивных технологий [1] позволяет существенно изменить подходы к изготовлению элементов технологической оснастки в литейном производстве. Как правило, производство модельных комплектов осуществляется преимущественно субтрактивной обработкой алюминиевых сплавов, древесных и полимерных материалов. Однако FDM-печать обеспечивает возможность оперативного производства мастер-моделей для ЛВМ, элементов модельных плит сложной геометрии, вставок стержневых ящиков, а также приспособлений для сборки и контроля. Существенным преимуществом является возможность оперативной корректировки конструкции, что сокращает длительность подготовительных операций и ускоряет производственный цикл.

При создании технологической оснастки для литейного производства ключевыми параметрами являются геометрическая точность, стабильность размеров при нагреве, стойкость к абразивному воздействию наполнителя, химическая инертность к разделительным составам, низкая усадка и пригодность к постобработке. Полимеры, применяемые в FDM-печати, должны сочетать эти свойства, что требует системного анализа их структуры, механики и методов контроля качества. Целью настоящей работы является оценка применимости современных FDM-материалов для изготовления литейной оснастки и формирование методики испытаний, отражающей реальные условия эксплуатации.

Для исследования выбраны шесть материалов: PA, PA-CF, ABS, PLA, PC и PETG [2]. Такой перечень материалов охватывает диапазон от доступных недорогих полимеров (PLA, PETG) до инженерных композитов и с повышенными эксплуатационными характеристиками (PA-CF, PC), что позволяет провести корректное сравнение по параметрам, значимым для литейного производства.

• PLA – полукристаллический алифатический полиэфир с жесткими эфирными группами –COO–, обладает высокой жесткостью, но низкой ударной вязкостью. Низкая температура стеклования (55–60 °C) приводит к быстрому снижению прочности при нагреве. Разрушается PLA хрупко из-за ограниченной пластичности и склонности к формированию поверхностных микротрещин.

• PETG – аморфный полиэфир, модифицированный гликолевыми звеньями, что уменьшает кристалличность и повышает ударную вязкость. Однако сравнительно низкая теплостойкость (HDT 70–80 °C) и умеренный модуль упругости ограничивают его износостойкость. Тем не менее PETG остается технологичным материалом для оснастки средней нагруженности благодаря стабильности размеров и химической стойкости.

• PA-CF представляет собой полиамид, армированный короткими углеродными волокнами. Армирующая структура снижает усадку, уменьшает анизотропию, ограничивает рост кристаллитов и частично экранирует амидные группы, уменьшая водопоглощение. В результате материал отличается высокой размерной стабильностью, жесткостью.

• Полиамиды (PA) относятся к полукристаллическим полимерам и содержат амидные группы –CONH–, формирующие развитую сеть водородных связей. Эти связи обеспечивают высокую прочность и вязкость, но одновременно делают материал чувствительным к влаге. Водопоглощение приводит к изменению размеров и снижению жесткости, что критично для точной оснастки. Тем не менее способность к пластической деформации делает PA востребованным в деталях, работающих под ударными нагрузками.

• ABS – аморфный сополимер, включающий стеклообразную SAN-матрицу и эластомерные частицы бутадиена. Такая морфология обеспечивает сочетание жесткости и ударной вязкости, однако аморфная структура склонна к образованию микротрещин при трении. Следует учитывать, что межслойные связи ABS слабее, чем в полукристаллических полимерах, что снижает прочность по оси *Z* и ускоряет его разрушение.

• PC – аморфный поликарбонат с жесткими ароматическими звеньями, соединенными карбонатными группами. Ограниченная подвижность цепей обеспечивает высокую теплостойкость и прочность. Аморфная структура способствует стабильности размеров, а способность к пластической деформации снижает вероятность хрупкого разрушения при трении.

Механические свойства данных полимеров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства полимеров для FDM-оснастки

Материал	HDT, °C	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Примечание
PLA	50–60	3000–3500	50–65	Высокая точность, низкая термостойкость
PETG	65–75	2000–3000	50–55	Умеренная химстойкость, средняя износостойкость
ABS	88–100	2000–2500	40–55	Хорошая стабильность размеров

Окончание табл. 1

Материал	HDT, °C	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Примечание
PA	65–75	2700–3300	70–85	Высокая вязкость, водопоглощение
PA-CF	160–200	6000–12000	80–160	Высокая жесткость, низкая усадка
PC	100–135	2200–2500	55–70	Высокая термостойкость и прочность

Оценка свойств полимеров традиционно проводится по отечественным стандартам: ГОСТ 11262-2017, ГОСТ 4648-2014, ГОСТ 12021-2017 и ГОСТ 11645-2021, а также по международным: ISO 178:2019, ISO 75-2:2013, ISO 1133-1-2022. Однако эти методы ориентированы на материалы, полученные литьем или прессованием, и не учитывают слоистую морфологию FDM-изделий, характеризующуюся анизотропией, межслойными границами и локальной пористостью. Эти особенности существенно влияют на эксплуатационные параметры и не отражаются в стандартных методиках.

Кроме того, ни один из действующих стандартов не предусматривает комплексной оценки поведения полимеров в условиях абразивного воздействия формовочных смесей. Литейная оснастка испытывает интенсивный износ при контакте с кварцевым песком, поэтому требуется специализированная методика испытаний. Для решения этой задачи проведены исследования, направленные на количественную оценку износа FDM-материалов.

Испытания проводились на шнековом смесителе периодического действия, моделирующем реальные условия работы оснастки. Частота вращения шнека составляла 2 об/с, что обеспечивало устойчивый абразивный поток. В качестве среды использовался кварцевый песок фракции 0,2–0,63 мм, массой 10 кг. Образцы представляли собой пластины 80 ×20 мм, которые погружались в песок и были разделены на три зоны по высоте. Такое деление позволило оценить влияние давления песчаного столба и локальной кинематики потока на износ.

Всего выполнено 10 000 условных погружений (съемов) образцов. Это значение сопоставимо с реальным ресурсом пластиковой оснастки, который варьируется от 200–500 съемов для низкостойких материалов до 10 000–30 000 для инженерных полимеров. Измерение массы и контроль геометрической и размерной точности осуществлялись через каждые 2000 циклов. Установлено, что максимальный износ наблюдается в зоне *1*, где давление песчаного столба и плотность контактов максимальны. В зоне *3* износ ниже из-за меньшего статического давления и более разреженного потока (табл. 2).

Таблица 2

Потеря массы и изменение размеров после 10 000 съемов

Материал	Δ*m* зона *1*, %	Δ*m* зона *2*, %	Δ*m* зона *3*, %	Δ*m* суммарно, %	Δ*a* толщина, мм	Δ*b* ширина, мм
PLA	1,20	0,65	0,4	2,40	0,18	0,12
PETG	0,91	0,52	0,37	1,80	0,14	0,10

Окончание табл. 2

Материал	Δ*m* зона *1*, %	Δ*m* зона *2*, %	Δ*m* зона *3*, %	Δ*m* суммарно, %	Δ*a* толщина, мм	Δ*b* ширина, мм
ABS	0,68	0,4	0,22	1,40	0,10	0,08
PA	0,52	0,33	0,21	1,00	0,08	0,06
PC	0,43	0,24	0,15	0,80	0,06	0,05
PA-CF	0,25	0,14	0,09	0,50	0,04	0,03

Даже при небольшой потере массы (0,25–1,2 %) фиксируется заметное снижение размеров в наиболее нагруженной зоне. Это объясняется локальным характером износа: разрушение концентрируется на кромках и выступах, определяющих точность формообразующей поверхности. Для литейной оснастки критичны изменения около 0,05–0,1 мм, что приводит к нарушению допусков и ухудшению качества разъема.

Таким образом, 10 000 условных съемов позволяют оценить эксплуатационную стойкость FDM-материалов в условиях, близких к реальным. PLA и PETG достигают уровня износа, соответствующего предельному ресурсу оснастки. ABS и PA демонстрируют средний уровень деградации, допускающий дальнейшую эксплуатацию, с учетом контроля размерной точности. PC и особенно PA-CF сохраняют геометрию значительно лучше, что указывает на их высокий потенциал для длительной работы, но и стоимость их выше.

Предложенная методика позволяет связать потерю массы с изменением геометрии и оценить пригодность различных FDM-материалов для изготовления литейной оснастки, работающей в условиях интенсивного абразивного воздействия.

Литература

1. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / И. Гибсон, Д. Розен, Б. Штукер, М. Хорасани ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2022. – 656 с.
2. Dave, H. Fused Deposition Modeling Based 3D Printing / H. Dave, J. P. Davim. – Cham : Springer, 2021. – 220 p. – DOI 10.1007/978-3-030-68024-4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ВЫЖИГАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

А. Д. Левкина

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

Научный руководитель Е. П. Поздняков

В современном литейном производстве и ювелирной промышленности широкое распространение получила технология 3D-печати выжигаемых моделей, которая позволяет создавать сложные геометрические формы с высокой точностью. Выбор материала для печати таких моделей играет ключевую роль, так как он должен обладать оптимальными свойствами для последующего выжигания без остатка и деформации. Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных материалов для 3D-печати выжигаемых моделей: воска, полистирола, полилактида (PLA), полиметилметакрилата (PMMA) и специальных фотополимерных смол. Рассмотрены их физико-химические свойства, технологические особенности

печати, а также параметры выжигания, что позволяет определить оптимальный материал для конкретных задач.

Ключевые слова: выжигаемые модели, полимерные материалы, сравнительный анализ.

В последние годы технология аддитивного производства выжигаемых моделей заняла ключевое место в современных литейных процессах, особенно в сферах ювелирного искусства и машиностроения. Этот инновационный подход позволяет формировать геометрически сложные и прецизионные конструкции, которые впоследствии служат основой для создания металлических отливок высокого качества. Главным критерием при выборе материалов для таких моделей является их способность к выжиганию без остатка, что исключает деформации и образование зольных включений при литье. Основная задача сравнительного анализа заключается в проведении комплексного сравнения материалов, применяемых для 3D-печати выжигаемых моделей. В ходе работы оценены физико-химические характеристики, технологические параметры процесса печати и выжигания, а также определены оптимальные сферы применения каждого из рассматриваемых материалов.

На сегодняшний день в аддитивном производстве выжигаемых моделей широко используются следующие материалы: воск, полистирол, полилактид (PLA), полиметилметакрилат (PMMA) и специализированные фотополимерные смолы. Каждый из этих материалов обладает уникальными свойствами (табл. 1), что обуславливает их применяемость в различных сферах промышленности. Эти свойства включают в себя термическую стабильность, механическую прочность, точность воспроизведения деталей, а также особенности процесса выжигания. В совокупности эти характеристики определяют эффективность и целесообразность использования того или иного материала в конкретных технологических задачах. Например, воск и полистирол используются благодаря своей низкой температуре плавления и полному выгоранию, но требуют к себе «осторожного» обращения из-за хрупкости и склонности к деформациям. Полимеры PLA и PMMA более устойчивы механически, но также имеют свои особенности в процессе выжигания. Фотополимерные смолы обеспечивают высокую детализацию и точность печати, но требуют строгого контроля температурного режима.

Таблица 1

Физико-химические свойства материалов для 3D-печати выжигаемых моделей

Материал	Параметры				
	Температура плавления, °C	Температура выжигания, °C	Плотность, г/см³	Прочность на растяжение, МПа	Усадка при охлаждении, %
Воск	60–70	300–400	0,9–0,95	0,5–1	1–1,5
Полистирол	100–110	450–500	1,04–1,08	30–50	0,4–0,7
PLA	150–160	500–600	1,24–126	50–70	0,5–1
PMMA	160	600–700	1,17–1,2	60 –80	0,3–0,6
Фотополимерные смолы	120–150	500–800	1,1–1,3	40–60	0,1–0,3

Воск – это природный или синтетический материал, состоящий преимущественно из длинноцепочечных углеводородов, сложных эфиров и жирных кислот. Его химическая формула может быть представлена как C_nH_{2n+2}, где n = 20–40. Воск отличается низкой температурой плавления, что облегчает процесс 3D-печати и последующее выжигание. Полное термическое разложение происходит при температурах 300–400 °C в течение 1–2 ч, при этом не остается зольных включений, что делает его идеальным для литья драгоценных металлов. Однако низкая механическая прочность и склонность к деформациям ограничивают его применение для сложных конструкций. Стоимость воска составляет 10–30 долл. за 1 кг.

Полистирол – это синтетический полимер, получаемый полимеризацией стирола (винилбензола), с химической формулой основного звена –CH–CH(C_6H_5)–. Он характеризуется низкой плотностью и хорошей обрабатываемостью, но хрупок и склонен к растрескиванию при механических нагрузках. Термическое разложение полистирола происходит при 450–500 °C в течение 2–3 ч с образованием ароматических соединений, таких как стирол и бензол, что требует использования систем вентиляции. Стоимость полистирола составляет 15–40 долл. за 1 кг.

Полилактид PLA – это биоразлагаемый полимер, получаемый полимеризацией молочной кислоты, с химической формулой основного звена –O–CH(CH_3)–CO–. PLA отличается высокой прочностью и жесткостью, а также хорошей биосовместимостью и экологичностью, что делает его привлекательным для применения в медицинских и пищевых приложениях. Термическое разложение PLA происходит при 500–600 °C в течение 3–4 ч, при этом может оставаться незначительное количество углеродных остатков. Стоимость PLA составляет 25–60 долл. за 1 кг.

Полиметилметакрилат PMMA – это термопластичный полимер, получаемый полимеризацией метилметакрилата, с химической формулой основного звена –CH_2–C(CH_3)($COOCH_3$)–. PMMA отличается высокой прозрачностью и механической прочностью, что делает его идеальным для создания ювелирных изделий и точных технических деталей. Термическое разложение PMMA происходит при 600–700 °C в течение 4–5 ч, при этом выделяются токсичные газы, такие как формальдегид и акролеин, что требует использования специального оборудования для очистки воздуха. Стоимость PMMA составляет 40–100 долл. за 1 кг.

Фотополимерные смолы – это композиционные материалы на основе акриловых или эпоксидных олигомеров, отверждаемых под действием УФ-излучения. Их химический состав включает олигомеры, мономеры и фотоинициаторы, что позволяет достигать высокой детализации и точности печати. Термическое разложение фотополимерных смол происходит при 500–800 °C в течение 5–6 ч, при этом возможно образование зольных остатков до 1–3 %. Их высокая стоимость и необходимость контроля процесса выжигания ограничивают применение для массового производства. Стоимость фотополимерных смол составляет 100–300 долл. за 1 кг.

Для наглядного сравнения материалов для 3D-печати выжигаемых моделей в табл. 2 приведены их технологические характеристики. Выбор материала для 3D-печати выжигаемых моделей зависит от конкретных требований к точности, прочности, скорости печати и условиям выжигания. Воск и полистирол остаются традиционными материалами благодаря своей простоте в обработке и полному выгоранию, однако их механическая хрупкость ограничивает применение для сложных конструкций. PLA и PMMA обеспечивают более высокую прочность и точность, но требуют более высоких температур для выжигания и могут оставлять незначительные зольные остатки.

Фотополимерные смолы, несмотря на высокую стоимость, обеспечивают наилучшую детализацию и точность, что делает их незаменимыми для создания высокоточных ювелирных изделий и микроразмерных деталей.

Таблица 2

Технологические характеристики материалов для 3D-печати выжигаемых моделей

Материалы	Параметры				
	Метод 3D-печати	Точность печати, мкм	Скорость печати, мм/ч	Зольный остаток после выжигания	Применение
Воск	FDM, PolyJet	50–100	10–20	Отсутствует	Ювелирные изделия, мелкие детали
Полистирол	FDM, SLS	100–200	20–30	Минимальный	Прототипы, литье металлов
PLA	FDM	50–150	30–50	Незначительный	Прототипы, образовательные модели
PMMA	FDM, SLA	20–50	10–20	Незначительный	Ювелирные изделия, точные детали
Фотополимерные смолы	SLA, DLP	10–50	5–15	Незначительный	Высокоточные ювелирные изделия

Для ювелирной промышленности, где требуется высокая точность и гладкость поверхности, оптимальным выбором являются фотополимерные смолы и PMMA. Эти материалы позволяют создавать модели с минимальными дефектами, что особенно важно для изготовления сложных украшений. В то же время для прототипирования и создания крупногабаритных моделей более подходящими могут быть PLA и полистирол, которые сочетают в себе доступность, простоту обработки и достаточную прочность.

В заключение можно сказать, что каждый из рассмотренных материалов имеет свои преимущества и ограничения. Однако для производства деталей методом литья по выжигаемым моделям в промышленных масштабах, учитывая стоимость материалов и их характеристики, наиболее рационально использовать материал PLA.

Литература

1. Иванов, А. А. Современные материалы для 3D-печати выжигаемых моделей / А. А. Иванов, В. В. Петров // Литейное производство. – 2022. – № 5. – С. 22–29. – DOI 10.17586/1684-257X-2022-5-22-29
2. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям / Г. Н. Митраков, С. Н. Евдокимов, Е. Г. Лаврик, В. С. Сазонов // Омский научный вестник. – 2015. – № 2 (140). – С. 80–84.
3. Кузнецов, Д. Д. Сравнительный анализ материалов для 3D-печати в литейном производстве / Д. Д. Кузнецов // Материаловедение. – 2023. – № 2 (548). – С. 18–25. – DOI 10.31044/1684-579X-2023-2-18-25

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

А. С. Петровский

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

Научный руководитель И. Ю. Ухарцева

Проанализированы технологии 3D-печати армированных композитов. Представлена характеристика способов решения проблемы межфазного взаимодействия при получении металломатричных композитов. Рассмотрены схемы роботизированной печати для формирования полимерных композитов.

Ключевые слова: металломатричные композиты, полимерные композиты, аддитивные технологии, роботизированная печать.

Композиционные материалы представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из матрицы и армирующего элемента, обладающего высокой прочностью. В отличие от традиционных материалов композиты позволяют совмещать в себе лучшие свойства каждого из компонентов, обеспечивая повышенную прочность, легкость, износостойкость и устойчивость к внешним воздействиям [1]. Современное машиностроение требует создания изделий с высокой удельной прочностью и сложной внутренней архитектурой. Интеграция аддитивных технологий с промышленными роботами открывает возможности для производства пространственно-армированных композитов, обладающих особыми свойствами [2–4].

Целью настоящего исследования является анализ современных тенденций в развитии аддитивных технологий и совершенствовании армированных композиционных материалов для определения наиболее перспективных направлений в производстве высоконагруженных деталей.

Наиболее широко применяемыми армированными композитами для различных отраслей промышленности являются металломатричные (ММК) и полимерные (ПКМ) композиты

Аддитивное производство позволяет преодолеть фундаментальную проблему традиционных методов (литье, порошковая металлургия) – плохую смачиваемость между керамическим армированием и металлической матрицей.

Исследования подтвердили эффективность использования микрочастиц нитрида циркония (ZrN) в алюминиевом сплаве при получении алюмоматричных композитов. Химическое взаимодействие ZrN с расплавом обеспечивает образование дополнительных упрочняющих фаз. Такое решение актуально для 3D-печати деталей, работающих в экстремальных условиях.

Установлено, что для получения титаноматричных композитов армирование титана непрерывными волокнами (борными или карбидокремниевыми) обеспечивает их меньшую растворимость в матрице при лазерном воздействии во время 3D-печати, что позволяет сохранить их армирующие свойства и значительно повысить ударную стойкость получаемых покрытий.

В области производства армированных ПКМ с применением аддитивных технологий наиболее доступным способом повышения жесткости и термостойкости является армирование короткими волокнами (PLA-CF, нейлон-CF). Однако ключевой прорыв связан с использованием непрерывного волокна, позволяющим создавать

изделия с максимальной прочностью за счет укладки волокна как послойно, так по сложным пространственным траекториям [3].

Согласно концепции стандартизации процессов, предложенной Мюнхенским университетом для систематизации многообразия технологических решений, выделяют пять основных схем реализации роботизированной 3D-печати непрерывно армированных ПКМ:

1. *In situ* пропитка. Принцип заключается в пропитке сухого непрерывного волокна (углеродного, базальтового, оптического) полимером непосредственно в экструзионной головке с последующим отверждением. Данный метод используют для комбинирования структурных и функциональных волокон, подбирая матрицу под требования по механическим свойствам и теплостойкости.

2. Коэкструзия препрега предполагает коэкструзию предварительно подготовленного препрега с добавлением термопласта для улучшения адгезии между слоями. В качестве матрицы используют низкотемпературные термопласты (поликарбонат, полилактид, термопластичный полиуретан), армирование осуществляют препрегами на основе углеродных, арамидных и борных волокон.

3. Экструзия препрега основана на экструзии полностью готового препрега, пропитанного термопластичным полимером. Преимущества данной схемы – высокая степень пропитки волокна, широкий выбор армирующих наполнителей и точный контроль состава материала.

4. *In situ* консолидация (автоматизированная укладка). Технология уплотнения «на месте» использует ленточный препрег, который нагревается дополнительным источником тепла на выходе из сопла и прижимается к поверхности прикаточным роликом. Данный подход позволяет использовать высокотемпературные термопласты семейства полиэфиркетонов (PEEK, PEKK).

Примером реализации является система роботизированной аддитивной печати (SCRAM), которая обеспечивает:

– 6 степеней свободы (против стандартных 2,5);

– вращающуюся платформу и климат-контроль;

– возможность точного управления ориентацией армирующих волокон для создания аэродинамических поверхностей.

5. Поточная пропитка – гибридный процесс, объединяющий традиционную подготовку композитных волокон (пропитку) с их последующим аддитивным нанесением через сопло на платформу построения [5].

Некоторые физико-механические характеристики современных материалов, применяемых для 3D-печати армированных композитов, представлены в таблице.

Физико-химические характеристики

Наименование материала	**σ_u, МПа**	***E*, ГПа**	**ρ, г/см³**	**УП, кДж/м²**	**Преимущество перед аналогом**
Al + ZrN	350–500	80–100	2,8	10–15	Прочность выше на 40–70 %, чем у AlSi10Mg
Ti + волокна	1200–2000	150–300	3,8–4,2	60–120	Прочность выше в 2–3 раза Ti-6Al-4V
PLA-CF	70–110	6–10	1,.25	3–5	Жесткость выше в 2–3 раза PLA
Nylon-CF	120–160	8–12	1,15	6–8	Прочность выше на 40–60 % , чем у нейлона

Окончание

Наименование материала	**σ_u, МПа**	***E*, ГПа**	**ρ, г/см³**	**УП, кДж/м²**	**Преимущество перед аналогом**
ПКМ + непрерывное волокно	700–1500	50–120	1,3–1,5	20–40	Прочность выше в 10–20 раз ABS/PLA
PEEK/PEKK + + волокно	1500–2500	120–180	1,4–1,5	30–50	Выдерживает более высокие температуры, чем PEEK

Из данных таблицы следует, что наряду с совершенствованием 3D-печати армированных композитов совершенствуются и материалы, применяемые для данной технологии.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что одним из наиболее перспективных направлений развития материаловедения является аддитивное производство непрерывно армированных композитов.

Аддитивные технологии получения металломатричных композитов обеспечивают возможность создания деталей из алюмоматричных и титаноматричных композитов, способных работать в экстремальных условиях авиационной и атомной отраслей.

В области полимерных композитов ключевым достижением является переход от послойного синтеза к роботизированной пространственной укладке непрерывного волокна. Рассмотренные современные схемы 3D-печати таких композитов позволяют изготавливать изделия с максимальной прочностью и жесткостью, недостижимой при использовании дискретного армирования. Наиболее технологически гибкими являются системы на базе промышленных роботов с 6 степенями свободы (например, SCRAM), обеспечивающие климат-контроль и возможность управления ориентацией волокон для создания сложных аэродинамических контуров.

Сегодня аддитивные технологии продолжают совершенствоваться. Основными направлениями развития являются разработка новых композиционных материалов, обладающих способностью к самовосстановлению, биодеградации, программируемыми свойствами такими, как изменение формы под воздействием внешних факторов [5].

Широкие перспективы для производства высоконагруженных деталей из непрерывно армированных композитов открывает интеграция аддитивных технологий с промышленной робототехникой. Дальнейшее развитие направления связано с расширением номенклатуры высокотемпературных термопластов и совершенствованием методов многоосевой укладки волокна при получении армированных композитов для авиационной, космической, морской и атомной промышленности.

Литература

1. Джонс, Р. М. Механика композитных материалов / Р. М. Джонс – CRC Press, 2018. – 564 с.
2. Бобрышева, С. Н. Современные полимерные композиционные материалы в машиностроении / С. Н. Бобрышева, И. Ю. Ухарцева // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 28 нояб. 2024 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024.– С. 69–71.
3. Петровский, А. С. Композиционные материалы для прототипирования в машиностроении / А. С. Петровский, И. Ю. Ухарцева // Инновационные технологии в агропромышленном комплекс – сегодня и завтра : сб. ст. 9-й Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 5 нояб. 2025 г. : в 2 ч. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2025. – Ч. 1. – С. 137–140
4. Петровский, А. С. Современные композиционные материалы для аддитивных технологий в машиностроении / А. С. Петровский // МИТРо 2025 – Машиностроение. Инновации. Тех-

нологии. Робототехника : тез. Междунар. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, 5 дек. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2025. – С. 188–190.
5. Ковалев, С. П. Металлические композиционные материалы: перспективы и проблемы / С. П. Ковалев // Материаловедение. – 2019. – № 6. – С. 52–58.

МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ СПЛАВЫ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А. О. Селицкий

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

Научный руководитель И. Ю. Ухарцева

Рассмотрены принципы формирования структуры металлополимерных систем. Проанализированы ключевые преимущества металлополимерных сплавов и области их применения в авиационно-космической отрасли. Определены основные этапы развития данного класса материалов до 2030 г.

Ключевые слова: металлополимерные сплавы, гибридные композиты, авиационная и ракетно-космическая техника, СИАЛ.

Современное авиа- и ракетостроение предъявляет все более жесткие требования к конструкционным материалам: снижение массы, повышение ресурса, обеспечение живучести при циклических и ударных нагрузках, а также устойчивость к внешним воздействующим факторам. Одним из наиболее перспективных направлений в решении этих задач является использование металлополимерных сплавов (МПС) – гибридных слоистых материалов, сочетающих несущую способность металлических сплавов с функциональными свойствами полимерных композитов.

Цель настоящего исследования – проанализировать и систематизировать данные о структуре, свойствах и практическом применении металлополимерных сплавов в авиакосмической отрасли, а также определить основные тенденции их развития на ближайшую перспективу.

Металлополимерные сплавы представляют собой гибридные композитные системы, образованные чередующимися слоями металлических сплавов (алюминиевые или титановые сплавы) и слоями полимерных композитов на основе углеродных, стеклянных или органических волокон. Такое архитектурное решение позволяет реализовать принцип синергии: металлическая составляющая обеспечивает пластичность, электропроводность и стойкость к локальным разрушениям, а полимерные слои вносят вклад в снижение плотности, высокое демпфирование и коррозионную стойкость [1, 2].

Формирование структуры осуществляется преимущественно методами автоклавного и вакуумного формования с использованием термореактивных связующих. Ключевым параметром является качество межслойной границы, определяющее совместную работу разнородных материалов при циклическом нагружении.

Применение металлополимерных сплавов в конструкциях летательных аппаратов обеспечивает ряд значимых преимуществ по сравнению с монолитными металлическими и традиционными композиционными материалами. Основными преимуществами таких материалов являются следующие [3]:

1. *Живучесть*. Основным фактором, определяющим безопасность полета, является способность материала сопротивляться распространению усталостных трещин.

В металлополимерных структурах за счет шунтирующего эффекта полимерных слоев рост усталостной трещины замедляется в 5–100 раз по сравнению с монолитными металлами.

2. *Виброакустическая выносливость*. Благодаря высокому внутреннему трению в полимерной матрице, МПС демонстрируют более чем десятикратное повышение виброакустической выносливости, что снижает уровень шума в пассажирских салонах и повышает ресурс элементов конструкции.

3. *Снижение массы*. Интеграция металлополимерных сплавов в планер позволяет достичь прямого снижения массы конструкции на 10–15 %, что непосредственно влияет на топливную эффективность и коммерческую нагрузку [3].

4. *Многофункциональность*. Помимо высоких прочностных характеристик материалы данного класса обладают повышенной огнестойкостью, низкой теплопроводностью и улучшенными демпфирующими свойствами.

Внедрение металлополимерных сплавов в авиационные конструкции осуществляется по трем основным направлениям [3]:

1) силовые обшивки крыла и фюзеляжа, воспринимающие циклические нагрузки и обеспечивающие высокую живучесть планера;

2) зоны соединения разнородных материалов, где МПС выполняют функцию буферных элементов, снижая концентрацию напряжений и предотвращая электрохимическую коррозию;

3) противопожарные перегородки, изготавливаемые благодаря высокой огнестойкости материала для изоляции салонов, грузовых и технических отсеков.

Указанные конструктивные решения реализованы в самолетах различных типов и модификаций, что подтверждает технологическую зрелость металлополимерных сплавов для серийного авиастроения.

Среди современных разработок для авиастроения особого внимания заслуживают металлополимерные сплавы СИАЛ (алюмостеклопластик). Данный материал создан на базе тонких листов (до 0,3 мм) алюминий-литиевого сплава 1441, отличающегося пониженной плотностью (около 2,6 г/см³) и повышенным модулем упругости, что позволяет снижать массу конструкции по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами [4, 5]. Как отмечают исследователи ВИАМ, данный материал характеризуется скоростью роста трещины не более 0,3 мм за цикл нагружения (при ΔK = 31 МПа/м) и пределом прочности свыше 600 МПа [3]. СИАЛ прошел успешную апробацию в элементах молниезащиты обшивки крыла самолета Бе-103, подтвердив устойчивость к термомеханическим воздействиям и высокую ресурсную надежность [4, 6]. Помимо алюминиевой основы ведутся разработки и других гибридных систем: титанооргапластиков (ТИОР) и титаноуглепластиков (ТИГРАН), которые применяются для усиления обшивки кессона крыла и создания переходных зон между углепластиком и металлическим силовым набором.

Для материалов ракетно-космической техники ключевыми требованиями являются минимальная масса, термостойкость и стабильность свойств при циклических температурных воздействиях. Этим требованиям в полной мере удовлетворяют металлополимерные сплавы. Примерами таких материалов являются: СИАЛ-1441 (алюмостеклопластик на основе алюминий-литиевого сплава, прошедший апробацию в элементах молниезащиты) [4]; GLARE (стеклоалюминиевый слоистый материал, используемый в обшивке Airbus A380) [2], а также перспективные титанооргани́ческие композиты, разрабатываемые для высоконагруженных элементов ракетносителей и спутниковых платформ [3]. Эти материалы находят применение в легких панелях спутниковых платформ и элементах конструкций ракет-носителей. На-

пример, снижение массы полезной нагрузки на 1 кг при использовании МПС позволяет сократить стоимость выведения на орбиту до 5–7 тыс. долл. США, что делает данный класс материалов экономически обоснованным для космических программ.

Согласно стратегическим приоритетным научным направлениям в Республике Беларусь до 2030 г., перспективными являются исследования в области космических систем и создании новых материалов с заданными свойствами. Одно из ключевых направлений развития материаловедения для авиационно-космической отрасли представляют собой металлополимерные сплавы. Интеграция этих материалов позволяет создавать конструкции с высокими показателями живучести, сниженной массой и улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Большое внимание уделяется созданию совместных научных центров по созданию и сертификации металлополимерных сплавов и других материалов для нужд авиации и космонавтики. Ведущим из таких центров является Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), в котором ученые Беларуси и Российской федерации проводят фундаментальные исследования в области трещиностойкости и долговечности гибридных слоистых материалов; циклической и ударной стойкости при моделировании реальных условий их эксплуатации; влияния климатических факторов и акустических нагрузок на ресурсные характеристики данных материалов. Результаты этих исследований формируют основу для создания отраслевых стандартов и методик сертификации, необходимых для масштабного внедрения МПС.

В результате проведенного анализа установлено, что металлополимерные сплавы являются одним из самых перспективных классов гибридных материалов для авиационно-космической отрасли. Использование таких материалов позволяет решить ключевую проблему современного авиастроения – сочетание низкой массы конструкции с высокой живучестью и ресурсом.

Дальнейший прогресс в этой области связан с решением трех основных задач: во-первых, это автоматизация технологических процессов формования для снижения себестоимости изделий; во-вторых, расширение номенклатуры выпускаемых гибридных материалов (в частности, создание высокотемпературных вариантов МПС для гиперзвуковых аппаратов); в-третьих, формирование единой нормативной базы и международных стандартов для сертификации МПС. Реализация указанных направлений обеспечит конкурентоспособность авиационной и ракетно-космической техники на ближайшие десятилетия.

Литература

1. Слоистые металлополимерные композиты / И. Н. Фридляндер, О. Г. Сенаторова, Л. И. Аниховская [и др.] // Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. / гл. ред. В. В. Фролов ; под ред. Е. Н. Каблова, И. Н. Фридляндера. – М., 2001. – Т. II-3 : Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. – С. 185–195.
2. Антипов, В. В. Металлополимерные слоистые материалы для авиационных конструкций / В. В. Антипов, Н. Ю. Серебренникова // Труды ВИАМ. – 2021. – № 5. – С. 22–30.
3. Слоистые металлополимерные, биметаллические и гибридные материалы // Офиц. сайт ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. – URL: https://viam.ru (дата обращения: 02.04.2026).
4. Каблов, Е. Н. Слоистые алюмостеклопластики СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и TU Delft / Е. Н. Каблов, В. В. Антипов, О. Г. Сенаторова // Цветные металлы. – 2013. – № 9. – С. 28–31.
5. Антипов, В. В. Технологичный алюминий-литиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе / В. В. Антипов // Металлург. – 2012. – № 5. – С. 36–39.
6. Конструкционные слоистые алюмостеклопластики 1441-СИАЛ / В. В. Шестов, В. В. Антипов, О. Г. Сенаторова [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 9. – С. 28–31.

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ РАСТОЧНЫХ ОПРАВОК

Л. С. Васильев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Псковский государственный университет», Российская Федерация

Научный руководитель И. П. Никифоров

Проведены экспериментальные исследования разработанной биметаллической и традиционной монолитной оправок при растачивании заготовок из Стали 20. Оценка вибраций проведена по среднеквадратичному значению сигнала и спектральному анализу. Установлено, что применение разработанной оправки обеспечивает снижение уровня вибраций в 2,4–2,9 раза, при этом шероховатость обработанной поверхности уменьшается на 14–78 %.

Ключевые слова: растачивание, вибрации, расточная оправка, жесткость, спектральный анализ, среднеквадратичное значение сигнала (RMS).

Целью работы является амплитудно-частотный анализ двух расточных оправок – цельной (монолитной) оправки из стали 40Х13 после закалки и высокого отпуска и оправки новой конструкции, с предварительным внутренним напряжением, изготовленной из Стали 20 и 40Х13.

Вибрации, возникающие при растачивании, снижают устойчивость процесса и точность обработки. Их уровень определяется жесткостью инструмента, которая при увеличении длины рабочей части оказывается недостаточной. Повышение виброустойчивости может быть достигнуто за счет изменения конструкции оправки.

Конструкция и технология изготовления оправки. Разработанная оправка представляет собой составную конструкцию, в которой формируются предварительные внутренние напряжения за счет конических соединений с натягом (рис. 1). Конструкция формируется из попарно изготавливаемых коротких цилиндрических элементов с внутренними коническими поверхностями (конусность Морзе – 1 : 20).

Рис. 1. 3D-модель составной оправки из запрессованных конических элементов

Сборка осуществлялась путем запрессовки конических элементов с натягом с последующим соединением методом ротационной сварки трением. Внешняя часть оправки изготавливается из стали 40Х13 с последующей термической обработкой (закалка при 1050 °С в масло и отпуск при 420 °С), внутренние конические элементы – из Стали 20 (в состоянии поставки). Это обеспечивает требуемые механические свойства конструкции и формирование предварительных напряжений. Более подробно технология изготовления оправки отражена в работе авторов [1].

Методика проведения эксперимента. Экспериментальные исследования проводились при растачивании трубных заготовок из Стали 20 на станке 1К62. Окончательная обработка выполнялась при постоянной подаче $s = 0{,}11$ мм/об. Вылет оправок – 80 мм; диаметр оправок – 16 мм; диаметр обработки – 37 мм; длина обработки – 10–15 мм. В качестве режущего инструмента были использованы сменные пластины: 1) твердый сплав – карбид вольфрама; 2) твердый сплав со вставками из кубического нитрида бора (КНБ). Переменные факторы экспериментов указаны в таблице.

Исходные данные и результаты экспериментов

Номер опыта	Частота *n*, об/мин	Глубина резания *t*, мм	Материал пластины	Тип оправки	RMS, дБ	K	Шероховатость, *Ra*	*R*
1	630	0,5	Твердый сплав	Цельная	–10,01	2,9	0,91	14 %
2				Составная	–29,26		0,80	
3	800			Цельная	–10,67	2,4	0,73	25 %
4				Составная	–25,65		0,58	
5	1000	0,3	КНБ	Цельная	–10,94	2,6	1,89	78 %
6				Составная	–28,06		1,06	

Регистрация вибраций осуществлялась с использованием пьезоэлектрических датчиков, установленных на головках расточных резцов. Сигнал записывался в виде аудиозаписей с частотой дискретизации 48 кГц. Анализ выполнялся по участкам установившегося процесса чистового растачивания длительностью 5 с. Обработка сигналов осуществлялась с помощью программы Adobe Audition. Шероховатость измерялась профилометром модели 296.

Анализ результатов исследования. Для количественной оценки уровня вибраций использовалось среднеквадратичное значение сигнала *RMS* (Root Mean Square), рассчитываемое по формуле

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2}, \tag{1}$$

где x_i – значения сигнала; N – количество отсчетов.

Для оценки эффективности разработанной оправки использовалось отношение значений:

$$K = \frac{RMS_{\text{мон}}}{RMS_{\text{разр}}}, \tag{2}$$

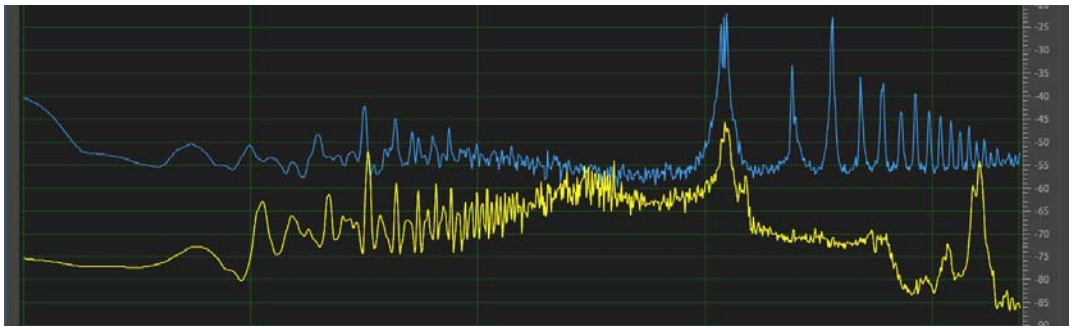
где $RMS_{\text{мон}}$ – среднеквадратичное значение сигнала для монолитной, цельной оправки; $RMS_{\text{разр}}$ – среднеквадратичное значение сигнала для разработанной, составной оправки.

Полученные значения коэффициента K приведены в таблице.

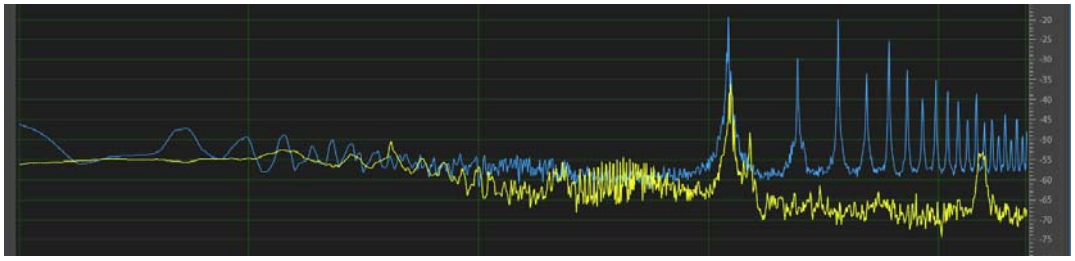
Для оценки шероховатости *Ra* используем относительное изменение параметра:

$$R = \left(\frac{Ra_{\text{разр}}}{Ra_{\text{мон}}} - 1\right)100\ \%. \tag{3}$$

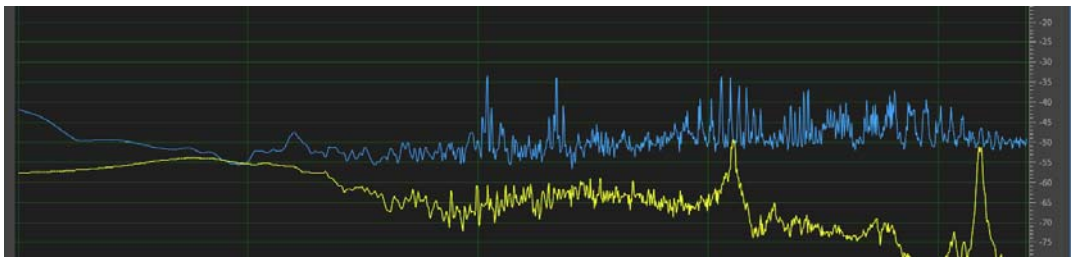
При анализе спектров вибрационного сигнала (рис. 2) установлено, что для обеих конструкций оправок сохраняется положение основных частотных составляющих. Наиболее выраженные пики наблюдаются в диапазонах 1–1,5 кГц и 2–4 кГц. При растачивании твердосплавной пластиной при $n = 630$ об/мин (рис. 2, *а*) наблюдается очевидное снижение амплитуды спектральных максимумов при использовании разработанной оправки. При этом снижается выраженность резонансных пиков и наблюдается сглаживание спектра вибрационного сигнала, что указывает на уменьшение интенсивности возбуждения колебаний. При $n = 800$ об/мин сохраняется аналогичная структура спектра (рис. 2, *б*). Эффект снижения вибраций выражен менее интенсивно по сравнению с режимом $n = 630$ об/мин. Для режима обработки пластиной со вставками из КНБ при $n = 1000$ об/мин (рис. 2, *в*) также наблюдается снижение уровня вибраций при использовании разработанной оправки. Спектр имеет более сложную и менее равномерную структуру, однако основные частотные пики сохраняют свое положение, а общий уровень амплитуд уменьшается.



а)



б)



в)

Рис. 2. Амплитудно-частные характеристики в логарифмическом масштабе (верхние графики – цельная оправка; нижние графики – составная оправка: *а* – опыты № 1–2; *б* – опыты № 3–4; *в* – опыты № 5–6 (см. таблицу)

В заключение можно отметить, что спектральный анализ показал: при использовании разработанной конструкции оправки с предварительным внутренним напряжением сохраняется положение основных частотных составляющих вибрационного сигнала, при этом уменьшается их амплитуда и снижается выраженность резонансных пиков. Количественная оценка по среднеквадратичному значению сигнала показала, что наблюдается снижение уровня вибраций в 2,4–2,9 раз, в зависимости от условия обработки, при этом шероховатость обработанной поверхности уменьшается на 14–78 %. Полученные результаты подтверждают эффективность применения оправки новой составной конструкции с предварительным внутренним напряжением.

Литература

1. Васильев Л. С. Повышение жесткости и виброустойчивости при глубоком растачивании / Л. С. Васильев, И. П. Никифоров, Е. А. Евгеньева // Металлообработка. – 2022. – № 4 (130). – С. 12–22.

ПРОБЛЕМЫ РЕЦИКЛИНГА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

У. А. Дуб

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Рассмотрены проблемы рециклинга композиционных материалов и предлагаются современные методы их решения. Отмечено, что основная цель работы – показать актуальность и масштабность проблемы.

Ключевые слова: рециклинг, композиционные материалы, композит, утилизация, пиролиз, гетерогенная структура.

Инженеры прошлого века стремились создать материал, который не боится времени: не ржавеет, не гниет и не теряет прочности десятилетиями. Композиты стали триумфом человеческой мысли, воплотив в себе идею «вечного изделия». Однако сегодня это совершенство обернулось технологической ловушкой. Человечество научилось создавать материалы, которые природа не может переработать за тысячи лет, и сами не научились разбирать их на составляющие. С каждым годом увеличивается производство и повышается число отходов композиционных изделий, тем самым засоряя планету. Проблема рециклинга композитов – это поиск способа помочь экосистеме, превратить путь изделия от завода до свалки в бесконечный цикл превращений. Недостаточно просто, например, растворить изделие, нужно придумать, куда «деть» полученную смесь, как ее правильно использовать, минимизировав материальные потери и ущерб окружающей среде.

В современном мире невозможно развитие промышленности без применения композиционных материалов. Они прочные, легкие и долговечные, что делает их незаменимыми в авиации, автомобилестроении и энергетике. Однако среди множества достоинств есть один огромный недостаток: композиты крайне сложно перерабатывать. С учетом значительного срока разложения в окружающей среде (около 200 лет), проблема поиска технологий утилизации отходов композиционных материалов является актуальной задачей.

Ученые долгое время «бьются» с пластиком, ищут подходящие методы его переработки и повторного использования, за каждую неправильно переработанную де-

таль люди несут большие материальные потери. В чем заключается основная сложность переработки композиционных материалов?

1. Прежде всего, главная сложность заключается в гетерогенности структуры. Композит – это «пирог» из связующего вещества, наполнителя, армирующих волокон и функциональных добавок.

2. Еще одна преграда для массового рециклинга сегодня – отсутствие экономической выгоды. Высокая стоимость: процессы термического и химического восстановления (например, сольволиз при сверхкритических условиях) требуют огромных энергозатрат и дорогостоящего оборудования.

3. Деградация свойств. Так, например, в процессе механической переработки волокна укорачиваются, что снижает их прочность. Это делает вторичное сырье непригодным для ответственного применения, переводя его в разряд наполнителей в лучшем случае для дорожного строительства («даунсайклинг»).

4. Немаловажным в этой теме остается экологический аспект. Переработка сопровождается выделением загрязняющих веществ.

На сегодняшний день огромная часть отслуживших композиционных изделий (например, лопасти ветрогенераторов или корпуса лодок) отправляется на свалки или сжигается. Лопасти ветряков могут достигать десятков метров в длину и не разлагаются столетиями. Захоронение таких отходов – это «мина замедленного действия» для экосистемы, а сжигание ведет к выбросу токсичных веществ. Из-за огромного количества неразлагаемых отходов, в первую очередь, страдают животные и растения, существует немало примеров исчезновения целых видов животных и нарушения естественного баланса растений.

Чтобы избежать экологической катастрофы, человечество должно осуществлять не только переработку композиционных изделий, но и правильно использовать их остатки. На сегодняшний день наука предлагает несколько путей решения проблемы:

– пиролиз: термическое разложение матрицы без доступа кислорода; позволяет восстановить углеродное волокно, но оно теряет часть прочности;

– сольволиз: химическое растворение смолы; метод эффективен, но требует использования дорогих и часто агрессивных реагентов;

– механический рециклинг: измельчение материала в крошку, которая затем используется как наполнитель для бетона или асфальта. Это «даунсайклинг» – снижение ценности материала.

5. Отсутствие стандартов: на 2025 г. в мире все еще не хватает единых протоколов сортировки и маркировки композитов, что затрудняет создание глобальных цепочек переработки.

Схема механического рециклинга дана на рис. 1.

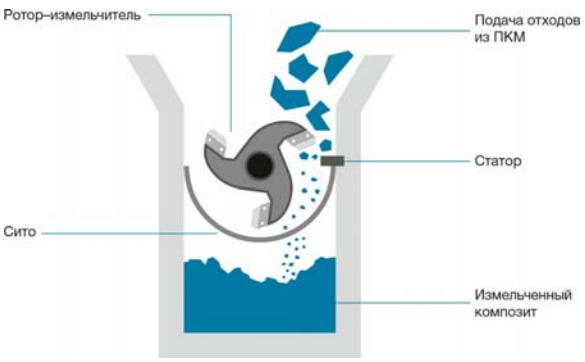


Рис. 1. Схема механического рециклинга

Таким образом, будущее рециклинга лежит в плоскости «проектирования для переработки». Инженеры работают над созданием биоразлагаемых смол и термопластичных композитов, которые можно перерабатывать многократно без потери качества. Проблема рециклинга композитов – это вызов для глобальной экономики замкнутого цикла. Без создания эффективной системы сбора и высокотехнологичных методов переработки экологический след от использования «материалов будущего» может перечеркнуть их технологические преимущества.

Литература

1. Переработка композитов: рециклинг и утилизация отходов ПКМ. – URL: https:pererabotka-kompozitov-retsikling-pkm-utilizatsiya-i-vtorichnaya-pererabotka-kompozitnykh-otkhodov-p/.
2. На пути к циркулярной экономике: химический рециклинг полимерных композиционных материалов // Электрон. б-ка БГТУ. – URL: https: elib.belstu.by/handle/123456789/31816.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ МЕТАЛЛОКОРДА

Д. В. Пермяков

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Отражено современное состояние, перспективные направления исследования методов определения изгибной жесткости металлокорда.

Ключевые слова: металлокорд, изгибная жесткость, шины.

Метод определения жесткости. При этом методе испытания образец корда зажимается в приборе для испытания на изгиб для определения жесткости и затем его изгибают при постоянной скорости. Для испытания на жесткость применяется прибор типа «Taber V-5» модели 150-B (рис. 1).

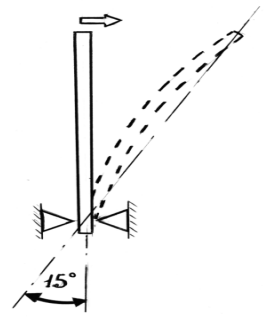


Рис. 1. Схема испытания металлокорда
на изгибную жесткость по методу «Табер»

Образцы отбираются по 70 мм непосредственно с катушки. При этом нельзя нарушать структуру корда. Образец изгибается влево на 15° с постоянной скоростью. Вычисляется приложенный момент, затем образец изгибается в противоположную сторону. Жесткость образца определяется как среднее арифметическое измерение изгибающих моментов в двух противоположных направлениях. В большинстве случаев

после окончания действия момента сгибания металлокорд не возвращается точно в исходное положение, сохраняя остаточную деформацию:

$$V = \frac{M - M1}{M} 100\ \%, \qquad (1)$$

где V – восстанавливаемость после изгиба, %; M – первоначальная жесткость; $M1$ – остаточная жесткость.

Обычно в корде общий момент сгибания представляется как сумма двух факторов:

– момент для уравновешивания упругих реакций материала, который зависит только от типа конструкции металлокорда;

– момент, необходимый для преодоления сил трения, которые противодействуют движению отдельных проволок. Это зависит от поверхностных характеристик проволок и от их взаимного давления прижатия.

Помимо испытания на жесткость просто металлокорда проводят испытания и в обрезиненном состоянии. Этот вид испытания более подходит для оценки свойств композита металлокорда – резины. Проведение испытания показало, что при испытании на жесткость металлокорд в обрезиненном и необрезиненном состояниях ведет себя по-разному – резиновая смесь создает дополнительно препятствие подвижности проволок металлокорда, увеличивая изгибную жесткость.

Кроме этого существует способ определения жесткости металлокорда, в частности, на фирме «Бекарт», на петле (рис. 2). Этим методом определяется степень возвращения корда в исходное состояние после того, как он был подвергнут определенной изгибной деформации. Восстанавливаемость выражается в процентах возвращения энергии.

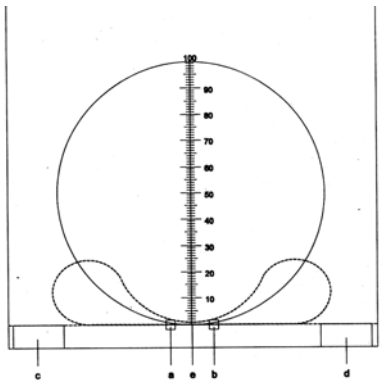


Рис. 2. Схема испытания металлокорда на эластичность

На жесткости сильно сказывается диаметр металлокорда как в обрезиненном, так и в необрезиненном состоянии. Предъявляя требования к конструкциям металлокорда в зависимости от показателя жесткости, можно говорить, что металлокорд, который закладывается в брекер, должен обладать высокой восстанавливаемостью, а металлокорд, который будет закладываться в каркас, – высокой пластичностью. Наличие оплетки снижает пластичность.

Согласно теории, каждый повив представляется с позиции энергетического подхода как эквивалентная по упругим свойствам анизотропная цилиндрическая оболочка, а сама проволочная конструкция рассматривается как система вложенных

друг в друга цилиндрических оболочек, между которыми допускается проскальзывание с учетом сил трения. Из-за сложной структуры проволочных конструкций возникают известные проблемы в оценках их деформаций, жесткостей, несущей способности и пр.

Прибор для определения жесткости «Taber V-5» (рис. 3) используется для оценки жесткости и эластичности слоистого пластика, картона, бумаги, легкого металлического листа, фольги или иных гибких материалов. Он дает возможность проводить не имеющие равных по своей стабильности исследования и производственные испытания путем стандартизации испытательного образца. Заранее определенные длина образца, угол отклонения и изменение нагрузки позволяют получить точные и воспроизводимые результаты испытаний.

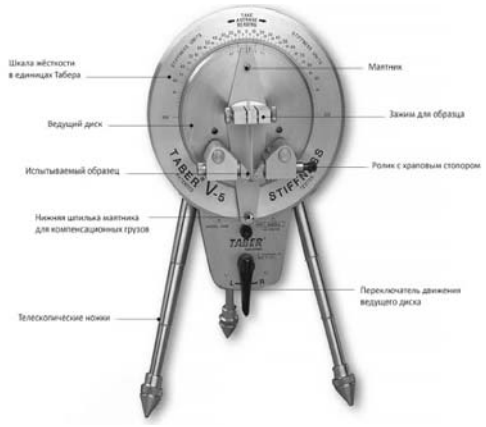


Рис. 3. Прибор для определения жесткости «Taber V-5»

Надлежащая эксплуатация прибора требует минимальных технических знаний, но ее необходимо соблюдать для получения стабильно точных данных. Система весов с маятником является точным и чувствительным методом измерения небольших увеличений нагрузки. Зажим с образцом закрепляется на маятнике, при этом нижняя сторона зажима располагается точно в центре вращения. Это обеспечивает постоянную длину испытуемого образца и угол отклонения для получения точных результатов с высокой точностью повторяемости. Оба зажима зажимного устройства регулируются с тем, чтобы можно было расположить испытательный образец строго в центре, независимо от его толщины. К нижнему концу образца прилагается сила при помощи валиков, прикрепленных к ведущему диску, расположенному непосредственно за маятником. Ведущий диск толкает валики к образцу и отклоняет его от вертикального положения. Маятник применяет возрастающий крутящий момент к образцу по мере его отклонения от вертикального положения. Прибор отображает моментную нагрузку, применяемую к испытательному образцу в единицах жесткости Taber (г · см).

Показания точки испытания возникают, когда отметка маятника совпадает с соответствующей отметкой ведущего диска (7,5° или 15°), которая указывает на показания жесткости на круговой шкале. Итоговое показание зависит от диапазона, в котором проводится испытание. Диапазон зависит от положения валика и нагрузки маятника (которая регулируется при помощи дополнительных разновесов). Показание умножается на соответствующий показатель шкалы в зависимости от диапазона испытаний.

Диапазон *2* (0–10 ед. жесткости) диапазона испытания увеличивает значения на шкале в десять раз, так что гибкие материалы могут тестироваться ниже диапазона *3* (10–100 ед. жесткости). При использовании компенсационного разновеса и за счет изменения направления валиков (для уменьшения длины испытуемого образца) увеличивается чувствительность данного испытания. В диапазоне *2* образец отклоняется как влево, так и вправо, и фиксируется показание. Для получения окончательного значения затем вычисляется среднее значение показания и делится на 10.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: изгибная жесткость провода может заметно меняться по мере его деформации, поскольку проволочные слои провода могут проскальзывать относительно друг друга, а отдельные проволоки – перемещаться внутри повивов. Следовательно, величины изгибной и крутильной жесткостей могут изменяться как вдоль оси провода, так и во времени.

Литература

1. Тестер упругости и жесткости материалов на изгиб. Taber 150 . – URL: https://www.qualicont.ru/products/taber/taber-150.html/.
2. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением : учебник / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1947. – 532 с.

ИЗГИБНАЯ ЖЕСТКОСТЬ МЕТАЛЛОКОРДА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ШИНЫ

Н. Н. Мельников

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Отражено современное состояние, перспективные направления исследования и изменения изгибной жесткости металлокорда.

Ключевые слова: металлокорд, изгибная жесткость, шины.

Использование металлокорда в качестве армирующего материала известно с 1937 г. (фирма «Мишлен»). В дальнейшем совершенствование конструкций металлокорда, его характеристик и технологии изготовления является улучшение экономических показателей непосредственно производства и конструкций металлокорда. Процесс появления новых конструкций металлокорда продолжается и сейчас. Все показатели физико-механических и адгезионных характеристик металлокорда произошли от оценочных испытаний текстильного корда и канатных изделий, в частности, авиационных канатов, и были направлены на увеличение ходимости шин. Поэтому определяющими факторами анализа качества металлокорда стали прочностные показатели и работостойкость при знакопеременной нагрузке. Дальнейшее развитие конструкций шин внесло добавочные характеристики для металлокорда с целью получения качественного обрезиненного полотна.

Корд в шине работает в весьма жестких условиях. Он подвергается разнообразным статическим и динамическим многократным деформациям растяжения, сжатия, изгиба, сдвига, кручения и т. д. [2]. Разнообразие условий работы корда вызывает необходимость изучения корда как конструкционного элемента шин. В настоящее время увеличение технического ресурса шин (ходимости) является одной из главных задач. Схема нагружения корда в резинокордном слое шины представлена на рис. 1.

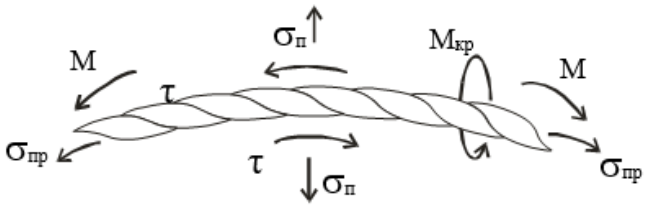


Рис. 1. Схема нагружения корда в резинокордном слое шины

Многих конструкторов шин при подборе металлокорда интересует характер изменения изгибной жесткости металлокорда. Показатель изгибной жесткости в брекерных слоях шин определяет ходимость шин, уровень сопротивления качению, совместно с величиной разрывного усилия – вес шин. Металлокорд, который закладывается в брекер, должен обладать высокой восстанавливаемостью, а металлокорд, который будет закладываться в каркас, высокой пластичностью. Наличие оплетки снижает пластичность.

Испытания металлокорда на жесткость проводят на приборе и по методике «Taber» [1]. Суть метода заключается в определении момента сопротивления изгибу, без структурного перемещения проволок в образце металлокорда. Прибор для определения жесткости «Taber V-5» представлен на рис. 2.

Рис. 2. Прибор для определения жесткости «Taber V-5»

Величина жесткости отечественного металлокорда зависит от технологии его изготовления и имеет ограничения в способах управления ее величиной. Практический диапазон жесткости металлокорда составляет от 30 до 1200 ед. Табера. Отечественный металлокорд имеет преимущественно повышенные значения жесткости, также требуется повышение стабильности этого показателя. Потребители металлокорда шинной промышленности запрашивают металлокорд с определенными по величине и постоянными в разных поставках значениями жесткости для эффективного производства шинной продукции.

Зависимость жесткости по Таберу, модуля растяжения и модуля упругости от физико-механических характеристик металлокорда различных конструкций приведена в таблице.

Зависимость жесткости по Таберу, от технических характеристик металлокорда типа 1 × *d*1 + 18 × *d*2

Конструкция	Шаг свивки, мм	Агрегатный разрыв $P_а$, Н	Нагрузка $P_н$, Н	Полное удлинение $\varepsilon_п$, %	Жесткость по Таберу
0,22 + 18 × 0,20	10	1677	800	2,2	45
	12,5	1712	1020	2,1	48
	16	1734	1020	1,98	47
	18	1739	860	2,26	47
0,20 + 18 × 0,175 ST	10	1650	860	2,37	26,6
0,20 + 18 × 0,175	10	1345	780	2,02	25

Как видно из таблицы, жесткость по Таберу возрастает с увеличением диаметра проволоки, но не зависит от шага свивки металлокорда (в диапазоне применяемых шагов) и прочности проволоки. Жесткость металлокорда в обрезиненном состоянии в основном же зависит от его конструкции и степени проникновения резины в структуру металлокорда.

Для исследования условий эксплуатации металлокорда в процессе работы были построены компьютерные модели, имитирующие нагружение в реальных условиях (рис. 3). Модели учитывали значения изгибной жесткости, полученные на приборе «Taber V-5».

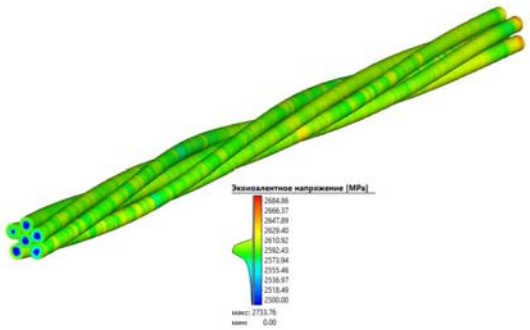


Рис. 3. Численная модель металлокорда

Распределение материалов в радиальном сечении шины 315/80R22,5 с дуговой координатой от 0 до 700 показано на рис. 4.

На рис. 5 изображена эпюра изменения усилий в нити металлокорда каркаса вдоль дуговой координаты срединной поверхности каркасного слоя от точки обода шины до точки обода. На параллелях Max1 и Max2, расположенных симметрично относительно экватора шины, усилия в нитях корда каркаса принимают в сегментах FEM_Shag0 и FEM_Shag180 минимальные и максимальные значения соответственно.

Вдоль беговой дорожки шины нагрузка от внутреннего давления распределяется между каркасом и брекером. В боковой стенке усилие в нити металлокорда каркаса практически не меняется.

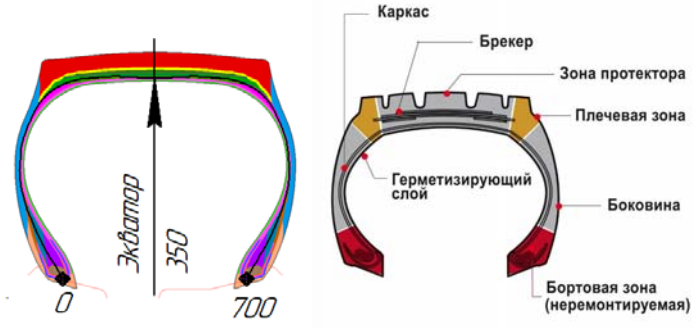


Рис. 4. Распределение материалов в радиальном сечении шины 315/80R22,5 с дуговой координатой от 0 до 700

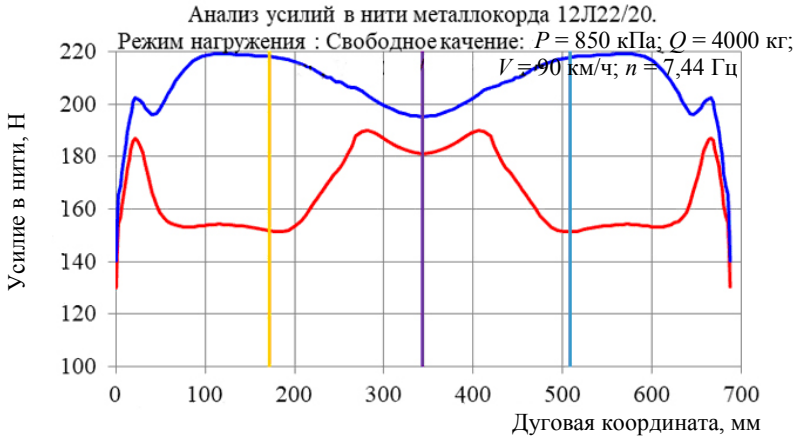


Рис. 5. Эпюры изменения усилий в нити металлокорда каркаса от точки обода шины до точки обода:
– FEM Sech0; – экватор;
– FEM Sech180; – Max1

Анализ усилий в металлокорде при вращении шины с рабочими нагрузками позволяет определить, насколько усилия в металлокорде при работе в шине отличаются от усилия агрегатного разрыва. Нагрузка разрыва металлокорда 0,22 + 18 × 0,20 составляет 800 Н, а в металлокорде в под нагрузкой в шине максимальное усилие – 200 Н. Запас прочности – 4, что достаточно. В результате исследований выполнен анализ нагружения металлокорда в автомобильной шине в процессе ее эксплуатации, что позволяет оценивать возможность эксплуатации металлокорда в шине.

Литература

1. Тестер упругости и жесткости материалов на изгиб. Taber 150. – URL: https://www.qualicont.ru/products/taber/taber-150.html/.
2. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением : учебник / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1947. – 532 с.
3. Модернизация метода Хантера испытания металлокорда в соответствии с условиями эксплуатации автомобильной шины / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов, А. В. Веденеев, А. В. Хотько // Черные металлы. – 2021. – № 11. – С. 45–49.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ С ФИЛЬТРАЦИОННЫМИ УЗЛАМИ ДЛЯ БЕЗДЕФЕКТНОГО ЛИТЬЯ СЛОЖНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ МАКРОСТРУКТУР: ИНТЕГРАЦИЯ CAD-ПАРАМЕТРИЗАЦИИ И CAE-ВЕРИФИКАЦИИ

Н. Н. Романюк

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

Для устранения брака (до 30 %) при литье тонкостенных и решетчатых структур предложен алгоритм CAD/CAE-проектирования литниковых систем. Оптимизация их геометрии и применение пенокерамических фильтров (30 ppi) снижают скорость расплава (< 0,5 м/с). Это исключает турбулентность, захват воздуха и неметаллические включения.

Ключевые слова: литниковая система, пенокерамические фильтры (ПКФ), CAD-параметризация, CAE-моделирование, число Рейнольдса, решетчатые макроструктуры.

Развитие технологий литья по выжигаемым 3D-печатным моделям дает возможность производить решетчатые макроструктуры с перемычками 0,5–1,5 мм. Однако традиционное проектирование литниковых систем неприменимо для таких деталей: брак достигает 20–30 % [1], а сложная геометрия исключает устранение дефектов механообработкой.

Цель работы – разработка интегрированного CAD/CAE-подхода к оптимизации литниковых систем с узлами фильтрации. Метод обеспечивает бездефектное заполнение форм и переход от принципа «отлить и проверить» к предварительной виртуальной верификации перед производством.

Тонкостенные перемычки решетчатых макроструктур отличаются высокой площадью контакта с расплавом (рис. 1). Это ускоряет отвод тепла и быстро повышает вязкость металла при заливке. Одновременно гидродинамические удары разрушают элементы формы, а захваченный ячейками воздух формирует газовые раковины и недоливы. Данные дефекты абсолютно необратимы.

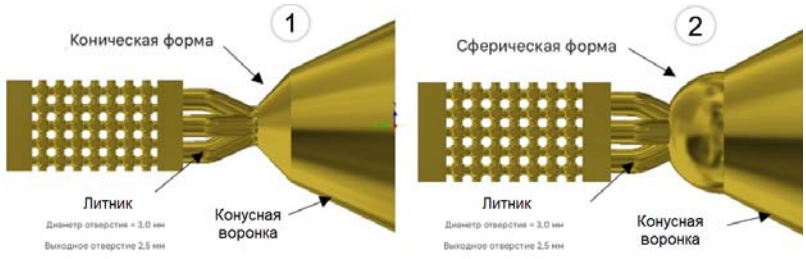


Рис. 1. Варианты геометрии переходного узла литниковой системы для подвода расплава к решетчатой макроструктуре:
1 – коническая форма; *2* – сферическая форма

Кроме того, качество изделий критически снижают неметаллические включения (НМВ) – частицы шлака, оксиды и продукты эрозии. Присутствие НМВ недопустимо в нагруженных ответственных деталях, где нормативы ограничивают наличие НМВ десятками миллиграммов на килограмм.

При литье черных металлов (до 1600 °C) основной причиной дефектов становится высокотемпературная кинетическая эрозия формы, порождающая экзогенные шлаковые включения.

Для цветных (алюминиевых, магниевых) сплавов механика иная. При скорости расплава свыше 0,5 м/с поверхность теряет устойчивость, формируя двойные оксидные пленки. Попадая в отливку, они действуют как готовые микротрещины, критически снижая усталостную прочность и пластичность детали. Во избежание образования двойных оксидных пленок скорость течения цветных сплавов (рис. 2) во всех сечениях литниковой системы строго не должна превышать 0,5 м/с.

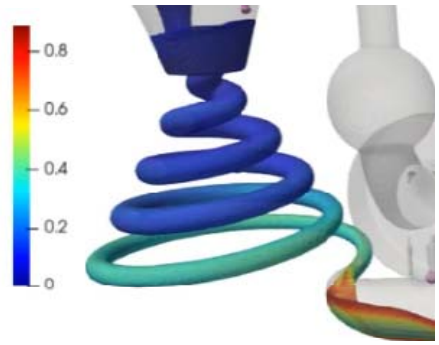


Рис. 2. Пример литниковой системы в виде спирали, экстремально снижающей турбулентность потока, и вероятность образования оксидных пленок

В литниковых системах применяются фильтры трех поколений (эволюция от 2D- к 3D-геометрии):

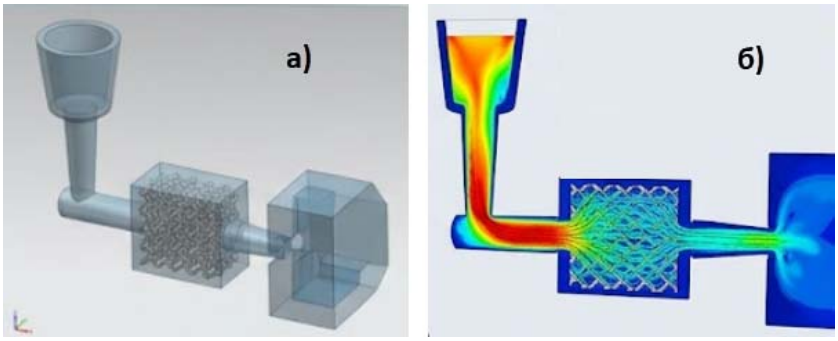
• I поколение (сеточные). Работают по ситовому механизму. Имеют минимальное гидравлическое сопротивление, но не гасят скорость потока и пропускают мелкие оксиды. КПД очистки: 30–40 %.

• II поколение (экструдированные сотовые). Выпрямляют и ламинаризуют поток в прямых параллельных каналах. Оптимальны для чугуна и стали, но улавливают лишь те частицы, которые случайно контактируют со стенками. КПД: 50–70 %.

• III поколение (пенокерамические фильтры – ПКФ). «Золотой стандарт» для ответственного цветного литья. Трехмерная губчатая структура реализует глубинную фильтрацию (рис. 3). Лабиринт пор заставляет расплав петлять, осаждая на керамических ребрах частицы размером 5–10 мкм (удерживаются силами Ван-дер-Ваальса). КПД ПКФ класса 30 ppi достигает 90–98 %.

Рис. 3. Развитие поколений фильтровальных элементов: переход к сложной 3D-структуре (III поколение) обеспечивает максимальную эффективность очистки, улучшение гидродинамики потока и появление сорбционных свойств

Вместе с тем использование ПКФ сопряжено с главным инженерным компромиссом: данные фильтры создают высокое гидравлическое сопротивление. Без компенсации падения давления расчетными методами расплав, лишенный кинетической энергии, не способен пролиться в тонкие перемычки решетчатой отливки. Это делает применение ПКФ невозможным без точного CAE-расчета гидравлических потерь и соответствующей компенсации сечений на этапе создания CAD-модели (рис. 4).



а) *б*)

Рис. 4. Компьютерное моделирование гидродинамики
экспериментальной литниковой системы:
а – исходная 3D-модель (CAD-геометрия) литникового хода с интегрированным
ячеистым (пенокерамическим) фильтром; *б* – результаты численного
моделирования (CFD): распределение скоростей потока расплава
и визуализация линий тока при прохождении через фильтрующий элемент

Для решетчатых структур фильтр позиционируется до первой точки разветвления потока. Параметрическое проектирование в САПР (NX, SolidWorks, КОМПАС-3D) создает адаптивные фильтровальные гнезда: изменение диаметра стояка автоматически перестраивает всю геометрию узла. Применяется «правило площадей» (Стояк : Зумпф : Фильтр : Питатель = 1 : 2 : 2 : 2–4). Канал перед фильтром расширяется в 2–4 раза, а обязательный элемент зумпф гасит энергию падающего расплава.

CAE-пакеты (ProCAST, LVMFlow) решают гидродинамику без отрисовки геометрии каждой поры (что потребовало бы миллиарды расчетных ячеек). Фильтр задается макроскопически как гомогенная пористая среда на основе уравнения Дарси–Форхгеймера: падение давления вычисляется через динамическую вязкость, плотность расплава и табличные коэффициенты проницаемости (K) и инерции ($C2$) для конкретного типа фильтра (например, 30 ppi).

Результаты и алгоритм оптимизации. Гашение турбулентности: базовый расчет (без фильтра) дает $v \approx 3{,}5$ м/с ($Re > 2300$), провоцируя захват воздуха и формирование пленок. Интеграция ПКФ гасит скорость в 10 раз – до $v \approx 3$ м/с ($Re < 100$). Устанавливается ламинарный поток, захват воздуха исчезает, эрозия формы падает на 95 %.

Ввод виртуальных оксидных маркеров подтверждает, что сетчатые и сотовые фильтры задерживают (см. таблицу) лишь 30–50 % включений. Пенокерамический фильтр (ПКФ) благодаря извилистому лабиринту пор обеспечивает осаждение частиц с КПД 90–98 %.

Сравнительная матрица литейных фильтров по ключевым эксплуатационным характеристикам

Параметр	Сетчатые (прессованные)	Сотовые (экструдированные)	Пенокерамические (ПКФ)
Принцип очистки	Поверхностный ситовый эффект (Cake Filtration)	Адгезия на гладких стенках прямых каналов	Глубинная многократная адгезия (Deep Bed Filtration)
Гидравлическое сопротивление	Низкое	Минимальное (сохраняют напор)	Высокое (требует компенсации в CAD)
Эффективность улавливания НМВ	~30–40 %	~50–70 %	90–98 %
Минимальный размер улавливания частиц	> размера ячейки сетки	Частицы, контактирующие со стенкой	5–10 мкм (меньше поры)
Ламинаризация потока	Практически отсутствует	Высокая (прямые каналы)	Максимальная ($Re < 100$)
Оптимальное применение	Массовое, недорогое литье	Чугун, крупногабаритная сталь	Цветные сплавы, решетчатые макроструктуры, аэрокосмическое литье
Защита от бифилмов (Al, Mg)	Отсутствует	Частичная	Полная – скорость ниже 0,5 м/с

Итерационный цикл оптимизации (CAD → CAE → корректировка): осуществляется базовая CAD-генерация → CAE-проверка на турбулентность → выбор и встраивание фильтра в CAD → CAE-верификация (лагранжева трассировка). *Критерии успеха алгоритма*: скорость расплава < 0,5 м/с; режим $Re < 100$; КПД очистки > 85 %; отсутствие недоливов.

Таким образом, сделаем следующие выводы:

1. При литье цветных металлов (Al, Mg) интеграция ПКФ (30 ppi, КПД 90–98 %) обязательна для ламинаризации потока и исключения неисправимых дефектов. Для чугуна/стали достаточен сотовый экструдированный фильтр (КПД 50–70 %).

2. CAD-параметризация мгновенно пересчитывает узлы, гарантируя соблюдение «правила площадей» без утечек.

3. CAE-расчет (пористая среда по Дарси–Форхгеймеру + метод Лагранжа) заменяет дорогие физические тесты точной виртуальной верификацией, делая гидродинамику управляемой.

Литература

1. Беляев, С. В. Основы металлургического и литейного производства : учеб. пособие / С. В. Беляев, И. О. Леушин. – Ростов-н/Д : Феникс, 2016. – 207 с. – URL: https://www.iprbookshop.ru/59404.html (дата обращения: 08.05.2026).
2. Campbell, J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design / J. Campbell. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2015. – 1128 p.
3. Некрасов, Г. Б. Основы технологии литейного производства. Плавка, заливка металла, кокильное литье : учеб. пособие для студентов учреждений высш. образования по специальностям «Машиностроительные технологии», «Оборудование и технология сварочного производства» / Г. Б. Некрасов, И. Б. Одарченко. – Минск : Выш. шк., 2014. – 287 с.

4. Open-cell ceramic foam filters for melt filtration: Processing, characterization, improvement and application / Y. Dai, C. Voigt, E. Storti [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 32. – P. 3402–3422. – DOI 10.1016/j.jmrt.2024.08.167

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ЛОМА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА СОСТАВА И СВОЙСТВ

С. С. Колесник

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

Исследование посвящено минимизации тепловых потерь в дуговых сталеплавильных печах, где 20–25 % энергии теряется с отходящими газами. Предложена концепция интеллектуальной системы адаптивного подогрева шихты, интегрирующая методы компьютерного зрения, анализаза волновой (звуковой) проницаемости шихты и цифровых двойников на базе моделирования. Алгоритм управления в реальном времени картирует морфологию лома, вычисляя параметры пористости и эквивалентного диаметра для прецизионной настройки тепловых потоков. Промышленное внедрение позволит обеспечить снижение угара металла в 2–3 раза, экономию природного газа на подогрев на 10–15 % и рост средней температуры подогрева лома на 150–200 °С.

Ключевые слова: ДСП, подогрев лома, цифровой двойник, Industry 4.0, энергоэффективность, моделирование, рециклинг.

Электросталеплавильное производство обеспечивает около 28 % мирового выпуска стали, при этом основным потребителем электрической энергии в цикле плавки является период расплавления металлической завалки в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). В структуре энергетического баланса современных ДСП суммарное потребление тепла составляет 640–680 кВт · ч/т, из которых 340–360 кВт · ч/т генерируется за счет электрической дуги, остальное – экзотермические реакции и тепло от работы топливно-кислородных горелок [1]. Потери с отходящими газами при этом достигают 143–205 кВт · ч/т (22–32 %), а температура газового потока на выходе из рабочего пространства составляет 1000–1200 °С [2, 3].

Технология предварительного подогрева шихты (ВПШ) представляет собой наиболее результативный из известных методов интенсификации ДСП-процесса: по данным сравнительного анализа ее вклад в снижение удельного расхода электроэнергии достигает 20–22 % от суммарного потенциала технологических мероприятий, тогда как применение топливно-кислородных горелок обеспечивает 12 %, вдувание кислорода в ванну – 10 %, использование жидкого чугуна – 10 % [1, 4]. Эмпирически установлено, что каждые 100 °С нагрева лома обеспечивают снижение удельного расхода электроэнергии на 13–15 кВт · ч/т [3, 5]. Вместе с тем практическая реализация высокотемпературного ВПШ (свыше 500–600 °С) сдерживается интенсивным окислением железа и образованием полихлорированных дибензодиоксинов и фуранов при термическом разложении органических загрязнений лома [6]. Среднетемпературный диапазон 300–500 °С признается оптимальным компромиссом, обеспечивающим значимый энергетический эффект при ограниченных экологических рисках и потерях металла от угара [5, 6].

Ключевым сдерживающим фактором для достижения целевых параметров нагрева является гетерогенность морфологии металлического лома. Вариативность гранулометрического состава, насыпной плотности, содержания органических загрязнений и влаги непосредственно определяет газопроницаемость слоя шихты, коэффициент межфазного теплообмена и, следовательно, равномерность прогрева по объему бадьи. В условиях работы традиционных алгоритмов АСУ ТП на жестких временных уставках разброс температуры по сечению шихты достигает ΔT 150 °C [7], что приводит к «закозлению» ванны ДСП холодными кусками крупногабаритного лома. Целью настоящего исследования является разработка методологии адаптивного управления режимами ВПШ в автономной бадье-термосе, основанной на комплексной оценке физико-химических свойств шихты методами инструментального экспресс-анализа и математического моделирования тепломассопереноса в пористой среде.

Энергобаланс дуговой сталеплавильной печи представлен на рис. 1.

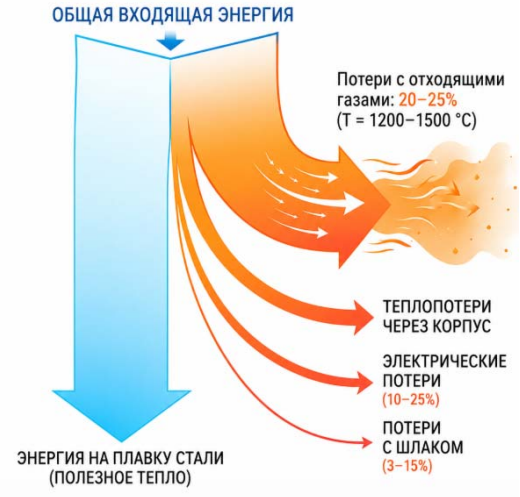


Рис. 1. Энергобаланс дуговой сталеплавильной печи

Существующие промышленные системы ВПШ подразделяются на две основные группы: установки, использующие тепло отходящих газов ДСП (шахтные печи Shaft EAF, системы непрерывного конвейерного подогрева типа Consteel), и автономные установки на природном газе (системы подогрева в бадьях) [4, 8]. Системы первой группы обеспечивают более высокие температуры подогрева (400–850 °C) при меньших затратах за счет утилизации вторичных энергоресурсов, однако требуют жесткой технологической синхронизации с режимом плавки, усложняют системы газоочистки и характеризуются значительными капитальными затратами и габаритами [8, 9].

Автономные бадьевые установки на природном газе сохраняют технологическую гибкость, допускают применение на предприятиях с любым плавильным агрегатом и обеспечивают термический КПД на уровне 70–85 % при использовании конструкции бадьи-термоса [9]. Применение специализированной бадьи-термоса с двойным корпусом (вставкой-обечайкой из конструкционной стали толщиной 6–10 мм с кольцевым зазором 50–100 мм, продуваемым холодным воздухом) полностью исключает конвективный теплообмен к несущему корпусу от высокотемпературных газов и вдвое снижает радиационный теплообмен, что позволяет нагревать шихту до 500–750 °C без угрозы деградации грузонесущих элементов [9, 10].

Для эффективного управления режимами предварительного подогрева шихты (ВПШ) критически важны три группы параметров:

1. Гранулометрический состав и плотность. Определяют пористость слоя (0,40–0,60), от которой зависит скорость потока теплоносителя. Смешанная загрузка (крупный лом и стружка) ведет к неравномерной проницаемости, образуя сквозные каналы продувки и «холодные карманы» с дефицитом температуры до 150 °С.

2. Влажность и органические загрязнения. Влага требует дополнительных энергозатрат на испарение. При 250–350 °С масла и СОЖ испаряются и пиролизуются. Их неконтролируемое горение вызывает локальные перегревы, взрывоопасность и перегрузку вытяжки, а при нагреве свыше 500–600 °С выделяются токсичные соединения.

3. Химический состав и окисляемость. Угар металла при ВПШ (550–600 °С) минимален (до 0,5 %) из-за высокой скорости нагрева и образования защитной оксидной пленки. Общий угар в связке «ВПШ–ДСП» (4–5 %) почти вдвое ниже, чем в дуговой печи без подогрева, благодаря сокращению времени окисления в зоне дуги.

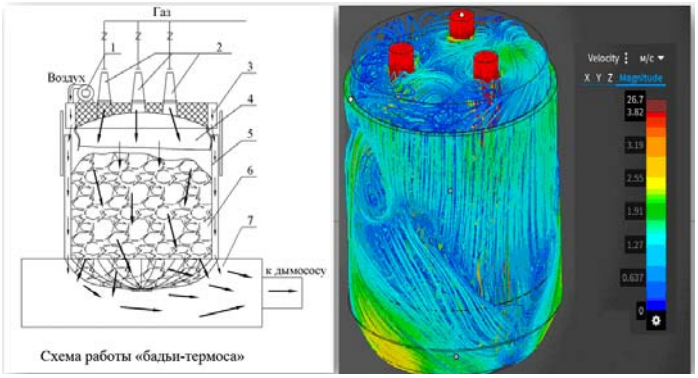
Для адаптивного управления ВПШ (см. таблицу) необходим отказ от долгих лабораторных тестов химического анализа (1–3 ч) в пользу экспресс-анализа на месте. Портативные анализаторы определяют состав за 30–90 с, но не идентифицируют легкие элементы (C, Si). Эту проблему решают лазерно-искровые спектрометры: они измеряют углерод (погрешность ± 0,05 %) за 5–15 с прямо на поверхности лома. Интеграция стационарных приборов в конвейеры для непрерывного потокового контроля позволяет формировать шихту заданного состава, снижая дисперсию углеродного эквивалента завалки с ± 0,08 до ± 0,03 %.

Сравнение экспресс-методов для управления ВПШ

Метод	Определяемые параметры	Время	В потоке	Ограничения
Визуальный осмотр	Категория лома, засоренность	Непрерывно	Высокая	Субъективность, отсутствие точных цифр
Рентгенофлуоресцентные спектрометры (портативные)	Элементный состав (кроме C, Si, O)	30–90 с	Средняя	Не определяет легкие элементы
Лазерно-искровые спектрометры (портативные)	Полный элементный состав (с C)	5–15 с	Средняя	Требует чистой поверхности лома
Машинное зрение	Гранулометрия, насыпная плотность	1–3 мин	Высокая	Чувствительность к освещению и пыли
ИК-термография	Влажность, температурное поле	Непрерывно	Высокая	Нет точной количественной оценки влаги
Лабораторный ОЭС	Точный химический состав	20–60 мин	Низкая	Временная задержка не позволяет управлять ВПШ

Верификация модели (рис. 2) выполнена на данных натурных испытаний опытно-промышленной установки с бадьей емкостью 6 т, оснащенной тремя инжекционными горелками суммарным расходом 270 м³/ч природного газа. Граничные усло-

вия: начальная температура шихты $T_0 = 20$ °С; температура продуктов сгорания на входе в слой – 950–1050 °С; порозность $\varepsilon = 0{,}44$ (типовая шихта из крупного лома); диаметр бадьи – 1,4 м; высота слоя 1,7 м [9, 10].



а) *б*)

Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема стенда прецизионного подогрева шихты (*а*) и распределение векторов скоростей (CFD-моделирование) газового потока в объеме загрузочной корзины (*б*):
1 – продувочный вентилятор; *2* – горелки; *3* – коллектор обдува; *4* – огнестойкая завеса; *5* – вставка: *6* – нагреваемая шахта; *7* – корпус стенда

Моделирование в ANSYS Discovery с использованием *k*–ε-модели турбулентности и пористого приближения показало, что при однородной порозности $\varepsilon = 0{,}44$ температурный перепад по высоте слоя через 25 мин нагрева составляет $\Delta T =$ 95–110 °С (максимум в нижней зоне, минимум в верхней). При смешанной шихте (50 % крупного лома + 50 % стружки) локальная порозность изменяется в диапазоне $\varepsilon =$ 0,35–0,58, что приводит к формированию каналов ускоренной продувки и росту ΔT до 145–160 °С [9]. Мгновенные скорости газового потока в каналах достигают 23–27 м/с при средней скорости фильтрации 3–4 м/с, что согласуется с результатами визуализации в ANSYS (рис. 2) Снижение удельного расхода электроэнергии на 28–33 кВт · ч/т непосредственно обусловлено ростом энтальпии шихты перед завалкой в ДСП. Теоретическая оценка: при нагреве стального лома от 20 до 485 °С прирост энтальпии $\Delta H = m\bar{c}\Delta T = 600 \cdot 0{,}55 \cdot 465 \approx 1{,}53$ ГДж (≈ 425 кВт · ч на одну бадью), что при КПД нагревательной установки η = 0,78 соответствует расходу природного газа ≈ 63 м^3 и потенциальной экономии электроэнергии в ДСП ≈ 355 кВт · ч (≈ 59 кВт · ч/т). Фактически достигнутая экономия 55–68 кВт · ч/т (с учетом сокращения tap-to-tap time и снижения расхода электродов) согласуется с термодинамическим потенциалом процесса и не противоречит законам сохранения энергии.

Литература

1. Лопухин, Г. А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства / Г. А. Лопухин // Электрометаллургия. – 2000. – № 7. – С. 3–12.
2. Дюдкин, Д. А. Производство стали в дуговых печах / Д. А. Дюдкин, В. А. Кисиленко. – М. : Теплотехник, 2008. – 539 с.
3. Смирнов, А. Н. Энергосберегающие технологии подогрева и окислительного рафинирования лома в современных ДСП / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, А. Ю. Нуров [и др.] // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 25–29.

4. Совершенствование технологии подготовки и переработки стального лома / А. М. Поживанов, А. А. Зайцев, О. В. Кулагин, В. И. Матюхин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2011. – 352 с.
5. Григорян, В. А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В. А. Григорян, Л. Н. Белянчиков, А. Я. Стомахин. – 3-е изд. – М. : МИСиС, 2004. – 260 с.
6. Рощин, А. В. Влияние органических загрязнений шихты на экологические и технологические показатели работы установок предварительного подогрева лома / А. В. Рощин, В. Е. Рощин // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 10–14.
7. Тимофеев, В. Н. Анализ методов оценки качества металлического лома и их влияние на показатели плавки в ДСП / В. Н. Тимофеев, П. С. Гринберг // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 5. – С. 341–347.
8. Rummler, K. Scrap Preheating and Continuous Charging System / K. Rummler, A. Tunaboyl // MPT International. – 2011. – N 5. – P. 44–49.
9. Установки подогрева шихты для электроплавки / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 68–74.
10. Ровин, Л. Е. Интенсивные режимы нагрева шихты / Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов, С. Л. Ровин // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С. 55–60.

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГАЗОКИСЛОРОДНЫХ ГОРЕЛОК В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА БАЗЕ ЭКСПРЕСС-CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

И. О. Вечерко

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

Выполнено параметрическое CFD-исследование восьми конфигураций стеновых газокислородных горелочных устройств (ГГУ) дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 т в Ansys Discovery Live (GPU-ускоренный Lattice-Boltzmann-решатель). Варьировались угол наклона оси горелки α (10–45°) и положение ГГУ. Оптимальная конфигурация (α = 28°, смещение в «темные секторы») обеспечивает долю тепловой мощности, переданной шихте, η_q = 61 %, площадь зоны переокисления $S_{\{O_2\}}$ = 0,02 м², коэффициент неравномерности температурного поля K_T = 1,28. По сравнению с нерациональными схемами прогнозируется снижение угара металлошихты на 12–15 % и уменьшение удельного расхода электроэнергии на 25–30 кВт · ч/т. Применение экспресс-CFD обеспечивает ускорение итерационного цикла проектирования до 20 раз относительно классического CFD.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, газокислородная горелка, угар металла, CFD-моделирование, Ansys Discovery Live, газодинамика, переокисление ванны, темные секторы, тороидальное течение, удельный расход электроэнергии.

Электросталеплавильное производство обеспечивает свыше 28 % мирового выпуска стали; его доля устойчиво возрастает по мере роста ресурсной базы металлолома и развития возобновляемой генерации [1]. Стеновые газокислородные горелочные устройства (ГГУ) традиционно рассматриваются как один из наиболее экономически эффективных инструментов форсирования плавки: рациональное применение ГГУ снижает удельный расход электроэнергии на 20–45 кВт · ч/т и сокращает плавку на 4–8 мин [4, 5]. Вместе с тем нерациональная ориентация факела порождает противоположный эффект: кислородная струя, направленная на поверхность жидкой ванны, вызывает локальное переокисление металла и интенсивное образование FeO, увеличивая угар металлошихты на 0,5–1,5 % от общей массы плавки [5, 6].

Традиционные CFD-расчеты в программах класса Ansys Fluent требуют 4–8 ч машинного времени на GPU-кластере для одной геометрической конфигурации, что

делает перебор большого числа вариантов нереализуемым на стадии концептуального проектирования [7]. Ansys Discovery Live реализует решение уравнений Навье–Стокса в режиме реального времени на базе GPU посредством адаптивного воксельного разбиения (Lattice-Boltzmann-based GPGPU-решатель), обеспечивая параметрическую чувствительность при интерактивном изменении геометрии. Применение данного инструмента к задаче оптимизации ГГУ в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) с явным критериальным анализом зон переокисления в литературе систематически не рассматривалось.

Цель работы – определение оптимального угла наклона α и азимутального положения трех стеновых ГГУ в ДСП емкостью 120 т на основании параметрического экспресс-CFD-исследования в Ansys Discovery Live, обеспечивающего минимальный угар металла, максимальный тепловой поток в зоны твердой шихты и равномерное газодинамическое перемешивание в рабочем пространстве.

Методика исследования. Объектом исследования является рабочее пространство ДСП типа FUCHS 120. Геометрическая модель построена в Ansys SpaceClaim на основании конструкторской документации агрегата. Основные параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры модели ДСП

Параметр	Значение
Номинальная емкость, т	120
Внутренний диаметр кожуха корпуса, мм	7 200
Диаметр рабочей ванны (на уровне откосов), мм	6 500
Глубина жидкой ванны, мм	1 100
Рабочий объем плавильного пространства, м³	≈ 120
Высота оси сопла ГГУ над уровнем порога, мм	850
Количество горелочных устройств, шт.	3 (симметрично)
Диаметр сопла горелки, мм	40
Тепловая мощность одной горелки, МВт	3,2

Рабочие среды – природный газ (CH_4 – 97 об. %, C_2H_6 – 2 об. %, N_2 – 1 об. %) и технический кислород (чистота ≥ 99,5 об. %). Коэффициент расхода окислителя $\lambda = 1{,}05$. Расход газа на горелку – 400 нм^3/ч; расход O_2 – 800 нм³/ч; скорость истечения из сопла – 88/176 м/с (газ/O_2); температура газов на вход – 20 °C. Поверхность жидкой ванны задана изотермической ($T = 1560$ °C); твердая шихта описана как пористое тело с коэффициентом порозности $\varepsilon = 0{,}40$.

Физическая модель включала: уравнения Навье–Стокса для несжимаемого течения в нестационарной постановке ($\Delta t = 0{,}1$ с); стандартную k–ε-модель турбулентности ($C_\mu = 0{,}09$); радиационный теплообмен (модель P1); упрощенную химическую кинетику горения (Eddy Dissipation Model, одностадийная реакция $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$). Верификационный расчет в Ansys Fluent показал расхождение интегральных характеристик поля скоростей не более 8–12 %, что достаточно для задачи параметрического отбора конфигураций [8].

Варьировались: 1) угол наклона оси горелки (рис. 1) к горизонтальной плоскости α: 10°, 20°, 28°, 30°, 45°; 2) азимутальное положение ГГУ – симметричное (шаг 120°) и смещенное в направлении «темных секторов» (азимутальный сдвиг $\Delta\varphi =$ 15–20°). Всего проанализировано 8 конфигураций. Среднее время расчета одной конфигурации в Discovery Live на GPU NVIDIA составило 15–25 мин против 5,5–7,0 ч в Ansys Fluent, что соответствует ускорению в 15–28 раз.

Критерии оценки: $S_{\{O_2\}}$ – площадь зоны с концентрацией свободного $O_2 > 5$ % над поверхностью ванны (минимизация); η_q – доля тепловой мощности горелок, переданной зонам твердой шихты (максимизация); $K_T = T_{\max} / T_{\min}$ – коэффициент неравномерности температурного поля (минимизация).

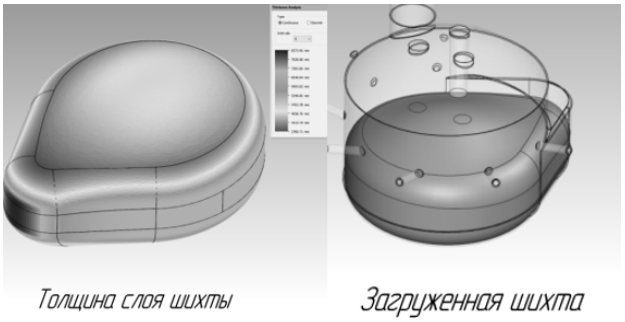


Рис. 1. Геометрическое представление области моделирования

Результаты моделирования. Конфигурации с $\alpha \le 10°$ нерациональны по критерию теплопередачи: при $\alpha = 10°$ факел распространяется практически горизонтально, не проникая в слой шихты. Продукты горения, поднимаясь к своду, формируют устойчивый застойный карман в нижней части «темного сектора» ($T \approx$ 800–950 °С) при перегреве свода до $T =$ 1620–1680 °С – на 130–180 °С выше нормативного значения. Результат: $\eta_q = 38$ %, $K_T = 1{,}67$. При $\alpha = 45°$ кислородная струя проникает в ванну ($M \approx 0{,}50$ у поверхности расплава), формируя обширную зону переокисления $S_{\{O_2\}} = 0{,}80$ м^2. При удельной скорости угара 0,40 кг/(м² · мин) [5] потери железа составляют ≈ 19 кг/мин; за горелочный период 17,5 мин – 336 кг/плавку. $K_T =$ 1,72 – наихудшее значение по всей выборке.

Оптимальная конфигурация $\alpha =$ 28° с азимутальным смещением ГГУ в «темные секторы» демонстрирует качественно иную газодинамическую картину. Факел проникает в слой шихты на глубину 350–420 мм без прямого контакта с ванной: расстояние от нижней границы зоны $C_{\{O_2\}} > 5$ % до поверхности расплава составляет не менее 400 мм. Ключевым газодинамическим эффектом является формирование устойчивого тороидального вихревого течения продуктов горения: горячие газы поднимаются вдоль оси агрегата к своду, охлаждаются, отклоняются к стенкам и опускаются, обеспечивая интенсивный конвективный теплообмен по всему объему. Данный механизм согласуется с описанным в [7] для тангенциального расположения горелок и с результатами [4, 9] о снижении теплопотерь через свод на 12–18 % при формировании замкнутых вихревых структур. Сводные результаты 8 конфигураций приведены в табл. 2.

Рис. 2. Комплекс результатов ализа

Смещение азимутальной позиции ГГУ от симметричной схемы в «темные секторы» при фиксированном $\alpha = 28°$ улучшает η_q на 4 п. п. и снижает K_T с 1,35 до 1,28, подтверждая независимую значимость азимутального положения как параметра оптимизации. Угол $\alpha = 28°$ представляет компромисс между двумя противоположными требованиями и согласуется с границами, установленными в [6] ($\alpha_{min} \approx 15°$) и [7] ($\alpha_{max} \approx 35°$ для геометрии близкого типоразмера).

Таблица 2

Сравнительные результаты параметрического CFD-исследования (8 конфигураций)

α, °	Расположение	$S_{\{O_2\}}$, м²	η_q, %	K_T	Примечание
10	Симметричное	0,00	38	1,67	Перегрев свода
20	Симметричное	0,15	52	1,41	–
20	«Темные секторы»	0,08	55	1,38	–
28	«Темные секторы»	0,02	61	1,28	Оптимум
30	Симметричное	0,18	57	1,35	–
30	«Темные секторы»	0,12	59	1,30	–
45	Симметричное	0,80	43	1,72	Критический угар
10	«Темныесекторы»	0,00	41	1,59	–

Обсуждение и оценка эффекта. Снижение $S_{\{O_2\}}$ с 0,80 до 0,02 м² при переходе от $\alpha = 45°$ к оптимальной конфигурации соответствует уменьшению потерь металла с 336 до 8 кг/плавку (на 328 кг/плавку). В пересчете на 120-тонную плавку удельный угар снижается на 0,27 кг/т; при 10 000 плавок/год и цене стали 2000 руб./т экономический эффект от снижения угара составляет $\approx 5{,}4$ млн руб./год. Одновременное снижение удельного расхода электроэнергии на 25–30 кВт · ч/т добавляет 5–6 млн руб./год. Приведенные оценки основаны на CFD-расчетах, а не на экспериментальных данных, и должны рассматриваться как прогностические для промышленной верификации.

Основное ограничение подхода – упрощенная одностадийная кинетика горения (EDM): модель не воспроизводит детальный состав продуктов горения (CO, H_2, несгоревший CH_4). По данным [11], разница в максимальных значениях концентрации CO между EDM и ECFM-кинетикой достигает 25–30 %, однако интегральные характеристики поля скоростей и температур совпадают с точностью 8–12 %, достаточной для параметрического отбора конфигураций. Второе ограничени – статичность модели шихты: учет динамики плавления потребует связанного расчета CFD + зада-

ча Стефана, что выходит за рамки данной работы. Возможность анализа 8 конфигураций в течение одного рабочего дня вписывается в парадигму иерархического «цифрового двойника» агрегата: экспресс-CFD → полный CFD → промышленная апробация [8].

Таким образом, сформулируем следующие выводы:

1. Параметрическим CFD-исследованием установлено, что конфигурации с $\alpha \leq 10°$ нерациональны по критерию теплопередачи ($\eta_q = 38\ \%$; $K_T = 1{,}67$: перегрев свода на 130–180 °C, застойная зона в «темных секторах»), а $\alpha \geq 45°$ недопустимы по критерию угара металла ($S_{\{O_2\}} = 0{,}80$ м^2; потери Fe ≈ 19 кг/мин; $K_T = 1{,}72$).

2. Оптимальной конфигурацией является α = 28° с азимутальным смещением ГГУ в «темные секторы»: $\eta_q = 61\ \%$; $S_{\{O_2\}} = 0{,}02$ м^2; $K_T = 1{,}28$; устойчивое тороидальное вихревое течение обеспечивает равномерный нагрев шихты по всему объему рабочего пространства.

3. Применение оптимальной схемы прогнозирует снижение угара металлошихты на 12–15 % и уменьшение удельного расхода электроэнергии на 25–30 кВт · ч/т; совокупный расчетный экономический эффект при производительности 10 000 плавок/год – не менее ~12 млн руб./год.

4. Ansys Discovery Live обеспечивает ускорение итерационного цикла проектирования в 14–28 раз по сравнению с классическим CFD (Ansys Fluent) при расхождении интегральных характеристик поля скоростей ≤ 12 %, что достаточно для концептуальной стадии отбора конфигураций ГГУ.

5. Полученная оптимальная конфигурация подлежит верификации в Ansys Fluent с детальным механизмом горения и последующей промышленной апробацией на пилотном агрегате.

Литература

1. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев [и др.] // Электрометаллургия. – 2005. – № 9. – С. 2–6.
2. Гудим, Ю. А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 547 с.
3. К вопросу о рациональной загрузке шихтовых материалов и расположении топливосжигающих устройств в ДСП-120 / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Глухов, И. В. Плесакин // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. – 2017. – № 4. – С. 45–49.
4. Воронов, Г. В. Особенности аэродинамики и температурного поля в рабочем пространстве современной ДСП / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Глухов // Известия вузов. – 2015. – № 58. – С. 645–651.
5. Сисев, А. А. Влияние режима продувки кислородом на угар металла в ДСП / А. А. Сисев, С. К. Носов // Электрометаллургия. – 2018. – № 4. – С. 12–17.
6. Кузьмин, А. Л. Физическое моделирование движения газов в рабочем пространстве ДСП при работе стеновых горелок / А. Л. Кузьмин, Н. А. Фомин, В. И. Столяров // Металлургия. – 2019. – № 8. – С. 34–40.
7. Zhu, H. CFD Simulation of Flow and Combustion in EAF with Oxy-fuel Burners / H. Zhu, X. Jiang, L. Qian // ISIJ International. – 2021. – Vol. 61, N 5. – P. 1432–1441.
8. Bölükbaşı, A. Optimization of Burner Positions in EAF Using Neural Network-Surrogate Models / A. Bölükbaşı, G. Özbayoğlu // Steel Research International. – 2022. – Vol. 93, N 3. – Art. 2100497.
9. Воронов, Г. В. Аэродинамика и тепловое состояние современной ДСП / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Глухов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2016. – № 1. – С. 28–34.

10. Глухов, И. В. Компьютерное моделирование аэродинамики в рабочем пространстве ДСП / И. В. Глухов, Г. В. Воронов // Энерго- и ресурсосбережение : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 2015 г. / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2015. – С. 88–91.
11. Глухов, И. . Сжигание природного газа с техническим кислородом в рабочем пространстве ДСП / И. В. Глухов, Г. В. Воронов // Теплотехника и информатика : сб. докл. IX Всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 13–14 мая 2021 г. / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2021. – С. 28–34.
12. Voronov, G. V. Physicochemical Properties of Natural Gas and Oxygen Combustion Products at Diffusion and Kinetic Burning / G. V. Voronov, I. V. Glukhov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham. – 2022. – P. 318–324.
13. Плесакин, И. В. Рекомендации по загрузке шихты и расположению ТСУ в ДСП-120 / И. В. Плесакин, Г. В. Воронов, И. В. Глухов // Теплотехника и информатика : сб. докл. VI Всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 2017 г. / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2017. – С. 98–102.

ПОЛУЧЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДА ЛЮТЕЦИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЭРБИЯ, И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ

О. С. Невзорова

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

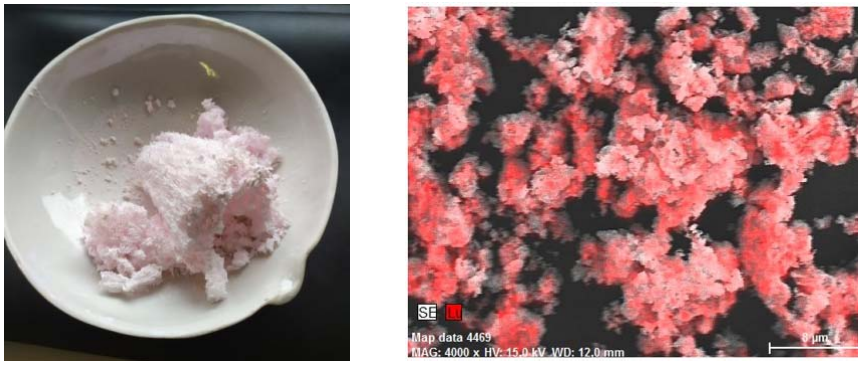
Научный руководитель А. А. Бойко

Наноструктурированные порошки оксида лютеция, легированного ионами эрбия, получены методом термохимического синтеза (горения) и являются перспективными для формирования лазерной керамики и сцинтилляторов. Источниками для синтеза были взяты азотнокислые соли лютеция и эрбия, полученные путем растворения оксидов лютеция и эрбия в азотной кислоте. В качестве комплексообразователя и горючего-восстановителя использована уксусная кислота, а диспергирующим агентом, применяемым для разделения агломератов, – поливиниловый спирт. Исследования морфологических и структурных характеристик с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показали, что образцы порошков $Lu_2O_3 : Er^{3+}$, прокаленные при 850 °С, имеют квазисферическую форму частиц с размерами 48–86 нм. Полученные порошки проявляют интенсивную люминесценцию в видимой и ИК-областях спектра с центрами на 560 и 1530 нм при возбуждении на длине волны 378 нм.

Ключевые слова: лантаноиды, наноструктурированные порошки, оксид лютеция, легирование, ионы эрбия, термохимический синтез.

Оптически прозрачная керамика на основе оксидов лантаноидов, легированная ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), является перспективным материалом для использования в качестве активной среды твердотельных лазеров, люминесцентных преобразователей, сцинтилляторов [1]. Оксид лютеция Lu_2O_3 имеет кубическую кристаллическую структуру большую ширину запрещенной зоны (около 6,5 эВ), что обеспечивает высокий уровень излучения активных легирующих ионов. Для получения эффективной генерации лазерного излучения требуется хорошее оптическое качество керамики и тонкая микроструктура, которую может обеспечить применение наноструктурированных порошков [2]. Перспективным направлением синтеза люминесцентных порошков оксида лютеция, активированного ионами эрбия, является применение термохимических реакций (метод «золь – гель – горение») [3].

Процесс синтеза оксида лютеция, легированного эрбием ($Lu_2O_3 : Er^{3+}$), осуществляют следующим образом. Оксиды лютеция и эрбия Lu_2O_3, Er_2O_3 с помощью азотной кислоты переводят в соответствующие нитраты, смешивают с уксусной кислотой и поливиниловым спиртом (ПВС) и упаривают смесь при 75–85 °С до состояния геля. Затем проводят термообработку геля в муфельной печи при температуре 850 °С в течение 2 ч. Под воздействием быстрого нагрева проходит термохимическая реакция синтеза легированного оксида лютеция и в результате получают вспененный порошкообразный продукт розового цвета (рис. 1, *а*).

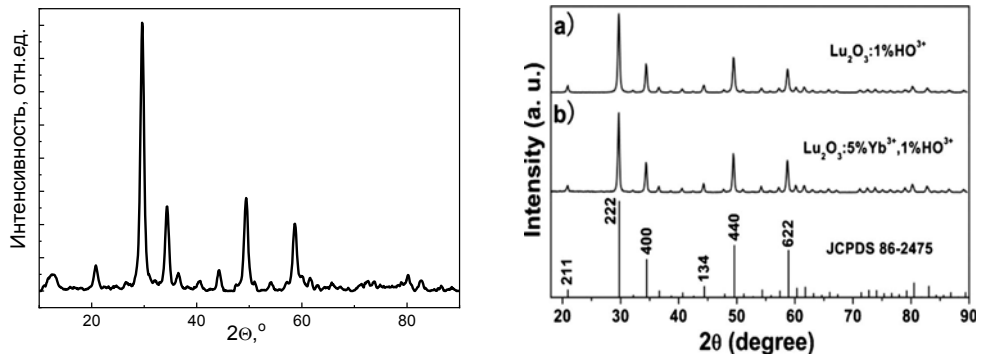


а) *б*)

Рис. 1. Полученный вспененный продукт
после прокаливания геля при 850 °С (2 ч):
а – общий вид; *б* – СЭМ-изображение

Изучены структурные, морфологические и спектрально-люминесцентные характеристики порошков $Lu_2O_3 : Er^{3+}$.

На основе анализа данных рентгенофазового анализа (РФА) полученных порошков можно сделать заключение, что образцы, прокаленные при 850 °С, являются наноструктурированными, с четко выраженными рефлексами, соответствующими кубической кристаллической структуре биксбиита состава Lu_2O_3 (каталог JCPDS № 86-2475) (рис. 2, *а*).



а) *б*)

Рис. 2. Дифрактограмма:
а – полученного наноструктурированного порошка $Lu_2O_3 : Er^{3+}$;
б – нанокристаллических порошков $Lu_2O_3 : Ho^{3+}$ и $Lu_2O_3 : Yb^{3+}$, Ho^{3+} [4]

Исследования морфологии порошков с использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали, что порошки $Lu_2O_3 : Er^{3+}$, прокаленные на воздухе, имеют квазисферическую форму частиц и являются агломерированными (рис. 3). Размеры первичных частиц порошка, получаемого в результате процесса горения с последующим прокаливанием при 850 °С, находятся в пределах 48–86 нм.

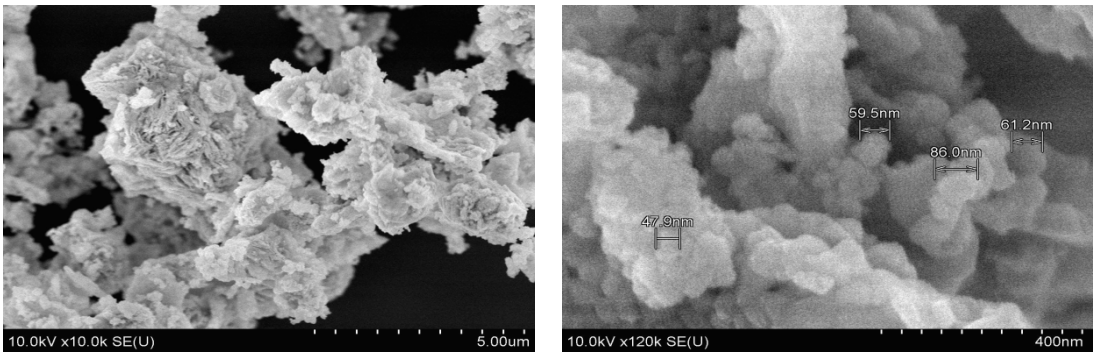


Рис. 3. СЭМ-изображение полученного наноструктурированного порошка $Lu_2O_3 : Er^{3+}$ при разном увеличении

Изучение полученных порошков методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) показало наличие атомов лютеция, эрбия и кислорода в соотношении, соответствующим формуле химического состава $(Lu_{0,98}Er_{0,2})_2O_3$. Других примесных фаз в составе образцов не обнаружено.

Спектрально-люминесцентные исследования порошков при возбуждении в УФ-области спектра ($\lambda_{возб} = 378$ нм) показали, что образцы $Lu_2O_3 : Er^{3+}$ люминесцируют как в видимой области спектра с центром на 560 нм (зеленое излучение), так и в ИК-области с центром на 1530 нм.

Таким образом, можно констатировать, что полученные наноструктурированные порошки $Lu_2O_3 : Er^{3+}$ перспективны для формирования лазерной керамики как видимого, так и ИК-диапазона спектра.

Литература

1. Materials development and potential applications of transparent ceramics / Z. Xiao, S. Yu, Y. Li [et al.] // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2020. – Vol. 139. – P. 1–66. – DOI 10.1016/j.mser.2019.100518
2. Fabrication and VUV luminescence of $Lu_2O_3 : Eu^{3+}$ (5 at. %) nanopowders and transparent ceramics / N. A. Safronova, R. P. Yavetskiy, O. S. Kryzhanovska [et al.] // Optical Materials. – 2020. – Vol. 101. – Art. 109730. – DOI 10.1016/j.optmat.2020.109730
3. Mukasyan A. S. Solution combustion synthesis of nanomaterials / A. S. Mukasyan, P. Epstein, P. Dinka // Proceedings of the Combustion Institute. – 2007. – Vol. 31, N 2. – P. 1789–1795. – DOI 10.1016/j.proci.2006.07.052
4. Yang, J. Sol-gel synthesis of nanocrystalline Yb^{3+}/Ho^{3+}-doped Lu_2O_3 as an efficient green phosphor / J. Yang, J. Lin // Journal of the Electrochemical Society. – 2010. – Vol. 157, N 12. – P. K273–K278. – DOI 10.1149/1.3496669

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАПЛАВЛЕНИЕМ СВЕРХПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

А. Ю. Кузнецов, С. В. Рогов

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

Рассмотрено применение композитных присадочных порошков, объединяющих твердый припой (тугоплавкий сплав: медь, серебряный, латунный) с температурой плавления выше 450 °С, часто до 1000 °С, обеспечивающий высокую прочность и жаростойкость соединений), и термостойкие сварочные материалы (к ним относятся материалы для сварки нержавеющей стали, чугуна, а также термостойкая холодная сварка), что способствует формированию пространственной дендритной решетки (ветвящаяся форма кристалла, образующаяся при кристаллизации металлов, сплавов и некоторых минералов) и эвтектической матрицы (структурный элемент сплава, представляющий собой мелкодисперсную смесь двух или более твердых фаз, которая образуется одновременно из расплава при постоянной температуре). Отмечена способность структуры к самозалечиванию трещин в процессе последующей термообработки, а также снижение остаточных напряжений в сварных соединениях. Подчеркнута возможность получения прочных, устойчивых к окислению швов без необходимости предварительного подогрева. Сделан вывод о применимости разработанного метода при изготовлении и ремонте деталей газотурбинных двигателей, а также других элементов авиационной и энергетической техники.

Ключевые слова: композитные присадочные порошки, междендритная эвтектическая матрица, сварные швы.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к соединениям и ремонтным технологиям изделий из сверхпрочных материалов. Традиционные методы сварки и пайки не всегда обеспечивают необходимый уровень прочности и долговечности, что стимулирует разработку новых технологических решений.

Одним из таких решений является метод наплавки с использованием композитных присадочных порошков, позволяющий сочетать преимущества твердого припоя (порошков) и высокотемпературных сварочных материалов, например: сплав никеля (Ni) и хрома (Cr) – нихромы (Х20Н80, NiCr80/20), никелевые сплавы с Cr, Fe, Mo – инконели (Inconel 625, Inconel 718, Inconel 738), кобальтовые сплавы – стеллиты (Stellite 6, Stellite 12), тугоплавкие сплавы на основе железа и никеля (ЭП617, ЭИ868, ЭП718), тугоплавкие металлы и их сплавы – молибден (Mo), вольфрам (W), тантал (Ta), ниобий (Nb) и порошковые материалы для наплавки (ПГ-СР2, ПГ-ХН80МТЮ, ПН-80НХ20, ПГ-КХН65ВТМЮ).

Далее рассмотрим метод наплавления, который заключается в том, что для достижения необходимого результата первоначально нужно нанести на основной материал присадочный порошок (композитный), который содержит от 50 до 95 % сварочного порошка (высокотемпературного) и от 5 до 50 % порошка твердого припоя. Немаловажно следить за тем, чтобы нагрев присадки и основного металла с использованием сварочного источника тепла происходил локально и одновременно.

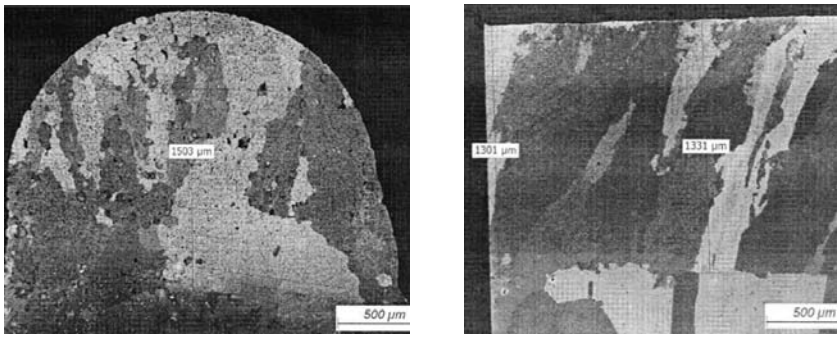
Следующий этап – это достижение полного расплавления припоя и частичного или полного перехода основного материала вместе с высокотемпературным сварочным порошком в жидкое состояние, образовывая сварочную ванну, однородность которой зависит от выбранных параметров.

В процессе, когда образованная нагревом сварочная ванна переходит на этап охлаждения и кристаллизации, начинает образовываться неоднородный наплавленный валик, включающий протяженную взаимосвязанную решетку из высокотемпе-

ратурных дендритов и междендритную эвтектическую матрицу, которая представляет собой смесь эвтектического состава, которая затвердевает в промежутках между ветвями первичных кристаллов (дендритов).

После чего следует плановая термообработка, выполняемая при температуре выше солидуса твердого припоя, но ниже температуры солидуса основного материала, при которой наплавленный валик частично расплавляется, что под действием капиллярных сил приводит к самозалечиванию трещин. При этом общая геометрия наплавленного валика сохраняется благодаря устойчивой дендритной решетке, сформированной из высокотемпературного сварочного порошка [1].

На рис. 1 приведена микрофотография поперечного и продольного разрезов наплавленных сварных швов Mar M247 – AWS A5.8 BNi-9, полученных на сплаве Inconel 738 с использованием микроплазменной сварки, после термообработки.



а) *б*)

Рис. 1. Микрофотография поперечного (*а*) и продольного (*б*) разрезов наплавленных сварных швов Mar M247 – AWS A5.8 BNi-9, полученных на сплаве Inconel 738 с использованием микроплазменной сварки наплавлением, после термообработки

Полученное изделие, восстановленное с использованием предпочтительного варианта осуществления, содержит исходный промышленный бездефектный основной материал с поврежденной областью, удаленной перед ремонтом и замененной композитным сварочным материалом, содержащим протяженную решетку из высокотемпературных дендритов, полученную во время кристаллизации сварочной ванны, и матрицу из твердого припоя, содержащего депрессанты температуры плавления [2].

В зависимости от требуемого размера наращиваемого шва с использованием нужного количества проходов подбирается температура таким образом, чтобы температура плавления высокотемпературного сварочного порошка была меньше температуры сварной ванны приблизительно в 1,20 раза, однако температура плавления твердого припоя должна превышать температуру ванны. Все это необходимо для обеспечения требуемого химического состава и микроструктуры сварных швов.

Преимущества метода:

– снижение остаточных напряжений – по сравнению с традиционными методами сварки;

– повышение стойкости к окислению – структура соединений демонстрирует более высокую коррозионную и термическую устойчивость;

– высокие механические свойства – прочность и долговечность сварных соединений превышают показатели классических швов;

– гибкость применения – этот метод обычно используется для соединения, восстановления размеров, ремонта корпусов, валов и других узлов [3].

Немаловажным преимуществом является то, что результат проделанной работы обладает устойчивостью к окислению, превышающую устойчивость основного материала.

Таким образом, предложенный способ наплавки сверхпрочных сплавов позволяет формировать уникальную композитную структуру соединений, улучшает механические и эксплуатационные характеристики деталей, расширяет возможности ремонта и продления срока службы элементов двигателей, валов и других немаловажных узлов.

Литература

1. Патон, Б. Е. Сварка и родственные процессы / Б. Е. Патон. – М. : Машиностроение, 1974. – 560 с.
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Козырев, Н. А. Металлургия сварки плавлением : учеб. пособие / Н. А. Козырев, В. Е. Белов – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – 412 с.
4. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учеб. пособие / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск, 2000. – 286 с.

МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЕНА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

И. П. Старовойтов

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

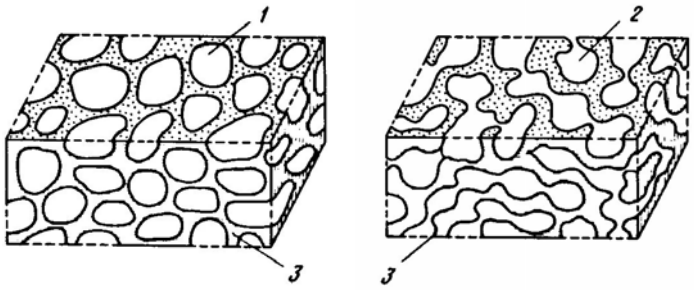
Научный руководитель А. Д. Левкина

Рассмотрены металлические пены (МП) – легкие композиты с ячеистой структурой (5–25 % металла), предназначенные для работы в экстремальных условиях. Описаны типы МП (закрытые, открытые, композитные), основные материалы (алюминий, никель, медь) и метод порошковой металлургии. Показаны преимущества МП в авиации и ракетостроении: термостойкость до 1500 °С, низкая теплопроводность, высокое энергопоглощение, снижение массы теплозащитных экранов на 40–60 %. Отмечены перспективы гибридных пен и градиентной пористости, а также то, что МП являются оптимальным решением для теплозащиты, ударопоглощения и фильтрации.

Ключевые слова: металлическая пена, классификация, применение, экстремальные условия.

Современное машиностроение сталкивается с задачами, требующими использования материалов, способных выдерживать экстремальные условия: высокие температуры, механические нагрузки, агрессивные среды и вибрации. Одним из перспективных решений являются металлические пены (МП) – это класс композиционных материалов, состоящих из двух компонентов: твердой части (ячеистая решетка из твердого металла) и газа, который создает в полости основного материала множество газонаполненных пор. При этом процентное содержание самого металла составляет всего 5–25 % от общей массы материала, из-за чего класс материалов получил название «металлическая губка».

По структуре пор выделяют три типа: с закрытыми порами (рис. 1, *а*) (поровая область изолирована, газ не циркулирует между ними, что обеспечивает повышенные плавучесть и жесткость материала), с открытыми порами (рис. 1, *б*) (ячейки сообщаются друг с другом, образуя тем самым единую сеть каналов) и с композитной структурой (ячейки в таком случае заполнены не газом, а другим материалом).



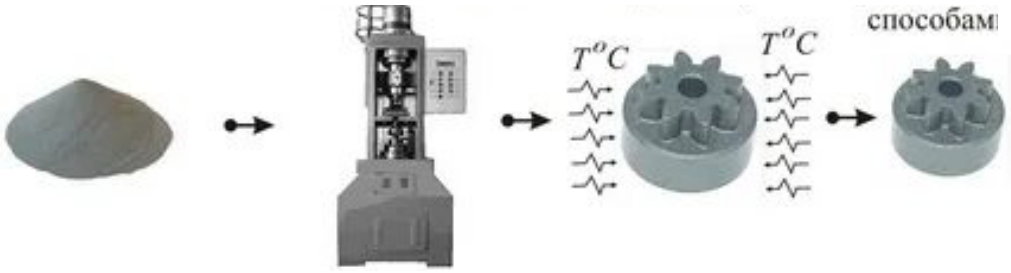
а) *б)*

Рис. 1. Металлическая пена:
а – с закрытыми порами; *б* – с открытыми порами:
1 и *2* – газ; *3* – твердый металл

Первый тип МП применяется для создания элементов плавучих конструкций в качестве амортизаторов и звукоизоляционных материалов. Тип с открытыми порами служит для создания фильтров для жидкостей и газов, деталей теплообменников, направленных на охлаждение электроники, электродами батарей или носителями для катализаторов. Третий тип МП имеет достаточно универсальное применение за счет свойств, обеспеченных использованием в структуре двух металлов (например, легкость металла-основы и прочность металла-наполнителя).

По типу используемого в основе металла также можно выделить три класса. К первому относятся МП на основе алюминия – самый распространенный вид. Сочетает небольшой вес с отличным шумопоглощением и демпфированием. Используется в автопромах и авиации для защиты от ударов. Никелевые пены – обладают значительной коррозионной стойкостью, большой удельной поверхностью. Применяются в фильтрах и батареях, каталитических нейтрализаторах. Медные пены отличаются высокими электро- и теплопроводностью. Используются для создания электродов батарей и теплоотводов.

Один из наиболее распространенных способов получения металлических пен – метод порошковой металлургии. Этот процесс начинается со смешивания металлического порошка (рис. 2, *а*), например, алюминиевого или титанового, с порофором – веществом, которое при нагревании выделяет газ. Полученная смесь прессуется в заготовку (рис. 2, *б*), после чего подвергается спеканию при температуре, близкой к температуре плавления металла (рис. 2, *в*). В процессе спекания порофор разлагается, выделяя газ, который формирует поры в металлической матрице. После охлаждения материал сохраняет пористую структуру, что придает ему уникальные свойства (рис. 2, *г*). Этот метод позволяет получать пены с закрытыми порами и контролируемой плотностью, что делает его особенно ценным для производства алюминиевых и титановых пен, используемых в авиационной и автомобильной промышленности.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 2. Процесс производства металлической пены

На данный момент времени МП – это только зарождающееся направление в материаловедении, поэтому среди стран СНГ общепринятой системы маркировки как отдельного класса материалов пока не сложилось. Обычно их обозначают по основе (например, «Алюминиевая пена АСП»), а в технической документации на продукцию часто используют аббревиатуру CMF (Composite Metal Foam) для композитных типов. Для никелевых пен (в фильтрах/теплообменниках) иногда применяется маркировка типа «Ni Foam» с цифровым указанием процента пористости и размера пор.

Одним из новых, востребованных и интенсивно развивающихся направлений экстремальных условий в машиностроении является теплозащита в авиационных и ракетных двигателях. В таких системах материалы должны выдерживать не только экстремальные температуры (в камерах сгорания и соплах ракет температура может достигать 1500–1700 °C, а давление – 200–250 атм), но и механические нагрузки, а также воздействие агрессивных сред, таких как окислительные газы и топливные смеси. Традиционные материалы, такие как жаропрочные стали и сплавы, имеют плотность 7,8–8,5 г/см³ и склонны к окислению при температурах выше 1000°C, что требует дополнительной защиты и увеличивает массу конструкции. Керамические материалы, хотя и выдерживают температуры до 2000 °C, обладают хрупкостью и низкой ударной вязкостью – их прочность на изгиб составляет всего 300–500 МПа, что ограничивает их применение в условиях динамических нагрузок. Полимерные композиты и углепластики начинают деградировать уже при 300–400 °C, теряя до 50 % прочности.

В таких экстремальных условиях оптимальным решением становятся металлические пены, в частности, алюминиевые пены (Al-foam) [2] с закрытой ячеистой структурой и пористостью 85–95 %. Эти материалы способны выдерживать температуры до 1000 °C, а при нанесении керамических или никелевых покрытий их рабочая температура повышается до 1400–1500 °C. Коэффициент теплопроводности алюминиевых пен составляет 0,5–2,0 Вт/(м · К), что в 10–20 раз ниже, чем у сплошного алюминия, обеспечивая эффективную теплоизоляцию. Например, в проектах Европейского космического агентства (ESA) алюминиевые пены толщиной 10–15 мм используются в качестве тепловых экранов, снижая температуру на защищаемой поверхности с 1500 до 200–300 °C.

Преимущества алюминиевых пен также включают высокую энергопоглощающую способность — до 50–70 МДж/м^3, что позволяет им выдерживать ударные нагрузки с ускорением до 1000 g без разрушения. Это свойство делает их незаменимыми для создания ударозащитных панелей в бронетехнике и авиационных конструкциях. Кроме того, металлические пены устойчивы к коррозии: скорость окисления алюминиевых пен при 800 °C составляет менее 0,1 мм/год благодаря пассивирующим оксидным покрытиям, что в 5–10 раз ниже, чем у обычных алюминиевых сплавов.

В будущем ожидается развитие гибридных металлических пен, например, на основе никелевых или титановых сплавов с нанопокрытиями, что позволит расширить их применение в условиях еще более высоких температур – до 1600–1800 °С. Уже сегодня ведутся исследования по созданию пен с градиентной пористостью, где внешний слой имеет пористость 90–95 % для теплоизоляции, а внутренний – 70–80 % для обеспечения механической прочности. Это открывает новые возможности для использования металлических пен в гиперзвуковых летательных аппаратах, ядерных реакторах и других высокотехнологичных областях.

Таким образом, металлические пены, особенно алюминиевые, представляют собой оптимальное решение для применения в экстремальных условиях машиностроения. Их уникальные свойства – низкая плотность (0,2–0,6 г/см³), высокая прочность при сжатии (до 50–100 МПа), термостойкость (до 1500 °С с покрытиями) и способность поглощать энергию – позволяют значительно улучшить характеристики конструкций. Например, замена стальных теплозащитных экранов на алюминиевые пены в ракетных двигателях позволяет снизить массу на 40–60 % при сохранении или даже улучшении теплозащитных свойств.

Литература

1. Шарма, Ш. Систематический обзор технологий производства металлической пены / Ш. Шарма, А. Йоши, Й. Раджпут // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 22–35. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25-4-22-35
2. Калиниченко, В. А. Вспененные пористые теплоизоляционные материалы на основе алюминия / В. А. Калиниченко, А. А. Андрушевич // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (66). – Спецвыпуск: пористые металлы и их применение. – С. 31–34.

ПРОБЛЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ВУЛКАНИЗИРОВАННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ И КОНЦЕПЦИЯ ПОЛНОСТЬЮ РЕЦИКЛИРУЕМЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

М. А. Горбачев

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

Научный руководитель А. Д. Левкина

Рассмотрена проблема переработки вулканизированных эластомеров на примере автомобильных шин. Необратимость химического сшивания делает традиционные методы утилизации (механический рециклинг, девулканизацию, сжигание) неэффективными: первый – снижает прочность, второй – дорог и сложен, третий – неэкологичен. Решение предлагается в изменении химической архитектуры материала. Внедрение динамических ковалентных адаптивных сетей (CANs) и обратимых сшивок (обмен дисульфидными связями, реакции Дильса–Альдера) позволит резине сохранять эксплуатационные свойства, но становиться пластичной при нагреве для повторной переработки. Также перспективна унификация полимерной основы, использование растворимых разделительных слоев и химическая деполимеризация. Сделан вывод, что создание полностью рециклируемой шины на основе термопластичных эластомеров переходит из области футурологии в инженерную плоскость.

Ключевые слова: вулканизация, шины, связи, материалы.

Вулканизированные эластомеры [1] – это полимерные материалы, в данном случае резина, подвергшиеся химическому сшиванию для улучшения прочности, эластичности и термостойкости. Основная проблема их переработки заключается в необратимости

вулканизации. К примеру, высокая сетевая структура препятствует плавлению и переработке традиционными методами термопластов. Разрушение сшитых связей требует химического или физико-химического воздействия, что сопровождается потерями механических свойств. Низкая экономическая и экологическая эффективность традиционных методов утилизации, т. е. путем сжигания и захоронении.

На сегодняшний день существует несколько основных подходов для переработки автомобильных шин [2]: механический рециклинг, девулканизация, энергетическая утилизация. Однако каждый из этих методов имеет значимые недостатки.

Механический рециклинг – шины измельчают в мелкую крошку. Эту крошку используют как наполнитель в асфальт, покрытия стадионов, как добавку в свежую резину и т. д. Проблема заключается в том, что при добавлении 5–10 % резиновой крошки в свежую смесь резко падают прочностные характеристики. Она не встраивается химически в новую вулканизационную сетку, что ведет к расслоению и снижению сцепления (доля переработанного материала, которую можно вернуть в производство новых шин, – 5–15 %). Эффективность переработки (выход полезной резиновой фракции) – 90–95 %.

Девулканизация – попытки частично разрушить серные связи без разрушения углеродной основы полимера. Проблема – технологии (термическая, ультразвуковая, химическая) сложны, энергозатратны и дороги. Достичь селективного разрыва именно серных мостиков, не повредив полимерную цепь, крайне трудно. В результате получается материал худшего качества (деструктат), который можно использовать только в менее ответственных изделиях (доля регенерата в смеси для новых шин без критической потери качества) составляет 15–25 %, а эффективность переработки (выход регенерата пригодного качества) – от 60 до 80 %.

Энергетическая утилизация [3] – так как шины обладают высокой теплотворной способностью, их сжигают в цементных печах или подвергают пиролизу. Проблема в том, что это неэкологично. При пиролизе теряются важные полимеры, получаем сажу, газ и жидкое масло сомнительной чистоты 0 %. Эффективность переработки (КПД извлечения тепловой энергии) составляет 70–85 %.

Чтобы шина стала полностью рециклируемой, необходимо пересмотреть ее химическую архитектуру. Основная цель – создать материал, который на протяжении всего жизненного цикла сохраняет эксплуатационные характеристики (безопасность, износостойкость), но на финальном этапе способен возвращаться в исходное мономерное состояние или легко перерабатываться без потери свойств.

Современная концепция базируется на трех способах: обратимая вулканизация, динамическое ковалентыне связи и проектирование с учетом разборки.

При рассмотрении способа «обратимые сшивки» вместо необратимых сульфидных мостиков (C–S–C) предлагается использовать динамические ковалентные адаптивные сети (CANs – Covalent Adaptable networks). Это соединения, которые ведут себя как термореактопласты (прочные, упругие) в условиях эксплуатации, но становятся пластичными при нагревании или определенном воздействии. Эффективность переработки: ~ 83 % (восстановление механических свойств). Возможность повторного использования: до 3–4 циклов. Можно выделить несколько основных типов реакций:

– обмен дисульфидными связями – использование полисульфидных олигомеров. При нагревании серные связи могут «обмениваться» партнерами, позволяя материалу течь: ~ 75,6 % (сохранение прочности). Возможность повторного использования средняя, так как есть риск образования побочной связи, такой как моносульфидная связь, при повторной вулканизации;

– борнокислые эфиры – использование обратимых реакций Дильса–Альдера. При повышенной температуре поперечные связи распадаются, полимер становится текучим и может быть переработан: 99 % (эффективность самовосстановления). Возможность повторного использования – до 3 циклов;

трансэтерификация – введение в резину гидроксильных групп и катализаторов, позволяющих перегруппировывать связи при нагреве: 88,3 % (сохранение прочности после переработки). Возможность повторного использования замкнутого цикла (Closed-Loop) с возможностью переработки – не менее 3 раз.

Современная шина – это композит из 10–20 различных материалов (разные типы каучуков, стальной корд, текстильный корд, техуглерод, силика, смолы). Разделить их механически невозможно. Концепция полностью рециклируемой шины предполагает:

– унификацию полимерной основы – использование одной базовой полимерной матрицы (например, полиизопрена или полибутадиена) для всех компонентов протектора, боковины и каркаса. Эта технология позволяет увеличить содержание переработанного материала в новой шинной смеси до 20 %;

– растворимые разделительные слои – введение специальных связующих слоев, которые при нагреве или воздействии растворителя теряют адгезию, позволяя легко отделить стальной корд от резины и текстиль от резины: можно достичь общей эффективности извлечения материалов до 98 %; процессы химического растворения в отличие от пиролиза могут проводиться при более низких температурах, что позволяет сохранить полимерную структуру и получать высокочистые продукты.

Вместо механического измельчения предлагается химическая деполимеризация – использование полярных эластомеров. Часть исследований фокусируется на переходе от неполярных углеводородов (натуральный каучук, бутадиен) к полярным полимерам (например, модифицированные полиуретаны или сложные полиэфиры), которые можно гидролизовать или аминолизовать обратно в мономеры.

Подводя итог, на сегодняшний день концепция полностью рециклируемой автомобильной шины переходит из разряда футурологии в инженерную плоскость. Решение лежит в области динамической химии ковалентных связей и проектирования с учетом конца жизненного цикла.

Наиболее перспективным направлением сегодня считается создание шин на основе термопластичных эластомеров нового поколения или резин с динамическими сульфидными связями, которые позволяют использовать методы переработки, схожие с термопластами (формование под давлением и экструзия), сохраняя при этом эластичность традиционных шин.

Литература

1. Патент РФ 2682347, МПК C08L 21/00, B60C 1/00. Вулканизированные эластомерные материалы для компонентов шин, содержащие модифицированные силикатные волокна, а также шины, выполненные из таких материалов : № 2018133297 : заявлено 11.09.2018 : опубл. 16.03.2019 / Джаннини Л., Лунги Д., Наха М. ; заявитель и патентообладатель Пиррелли Тайр С. П. А. – 16 с.
2. Долинская, Р. М. Рециклинг отходов резинотехнических изделий (обзор) / Р. М. Долинская, Н. Р. Прокопчук // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 6–24.
3. Шиповалов, Д. А. Утилизация и переработка резинотехнических отходов от автотранспортных средств измельчением в крошку (обзорная статья) / Д. А. Шиповалов, И. В. Насакин // Студенческий научный форум – 2016 : материалы VIII Междунар. студен. науч. конф., 2016. – URL: https://scienceforum.ru/2016/article/2016023839 (дата обращения: 30.04.2025).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ГОРЯЧЕМ ПОСАДЕ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА

В. М. Бубнов

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Представлены результаты исследования методами машинного обучения причин образования дефектов «сетчатые трещины» при нагреве с горячего посада непрерывнолитых заготовок сечением 250 × 300 мм из стали Т84S. Установлено влияние явления рекалесценции на образование дефектов из-за разного температурного расширения внешних и внутренних слоев в диапазоне температур перехода γ-железа в α-железо, сопровождаемого выделением тепловой энергии.

Ключевые слова: сетчатые трещины, рекалесценция, непрерывнолитая заготовка, горячий посад, перлитная колония.

Объектом исследования является технологический процесс нагрева непрерывнолитых заготовок (далее – НЛЗ) сечением 250 × 300 мм из стали Т84S в условиях стана 850.

Цель работы – определение причин образования дефекта «сетчатые трещины» при прокатке НЛЗ 250 × 300 мм на круг Ø 160 мм с горячего посада в условиях стана 850.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

– обработка исходных данных;

– разработка модели и ее машинное обучение. Проведение численного исследования по данным натурного эксперимента по методикам [1, 2];

– анализ результатов и формулирование выводов.

Непрерывнолитые заготовки 250 × 300 мм производятся по штатной технологической схеме с учетом марки стали, применяемой для прокатки сортовых и арматурных профилей. С загрузочных решеток НЛЗ нагреваются в методической печи до температуры 1245–1265 °С и прокатываются на реверсивном стане 850 [3].

При освоении проката Ø 160 мм из стали Т84S (аналог: автоматная сталь 13Г) был выполнен горячий посад НЛЗ 4-х плавок. При этом после первых двух плавок произошла аварийная ситуация и НЛЗ не садили в печь, оставляя их на решетках. Далее посад и прокатку продолжили, но НЛЗ за 2 ч простоя остыли в среднем на 80°. При этом первые плавки, прокатанные по штатному режиму, практически полностью были отправлены в брак из-за сетчатых продольных трещин, а плавки с подстуженными НЛЗ прокатаны почти без брака (см. таблицу). Разницы в режимах нагрева и прокатки по всем плавкам не было. Основным отличием были температура и время до посада.

Исходные данные

Температура блюмов	Время до посада	Результат
720–750 °С	~20 мин	Сетчатые трещины по всем штангам
620–660 °С	~100 мин	Минимальное количество поверхностных дефектов

Исходная выборка данных составила 92 записи – по 20–30 записей с каждой плавки. Метка качества задана на уровне плавки. Для каждой плавки построен технологический профиль как медианное значение параметров по ручьям: температура посада, время от окончания разливки до посада, время выдержки в нагревательной печи, пауза и длительность прокатки, суммарное время прокатки и доля паузы; отдельно учтены показатели химического состава (углерод, марганец, кремний, углеродный эквивалент) (рис. 1).

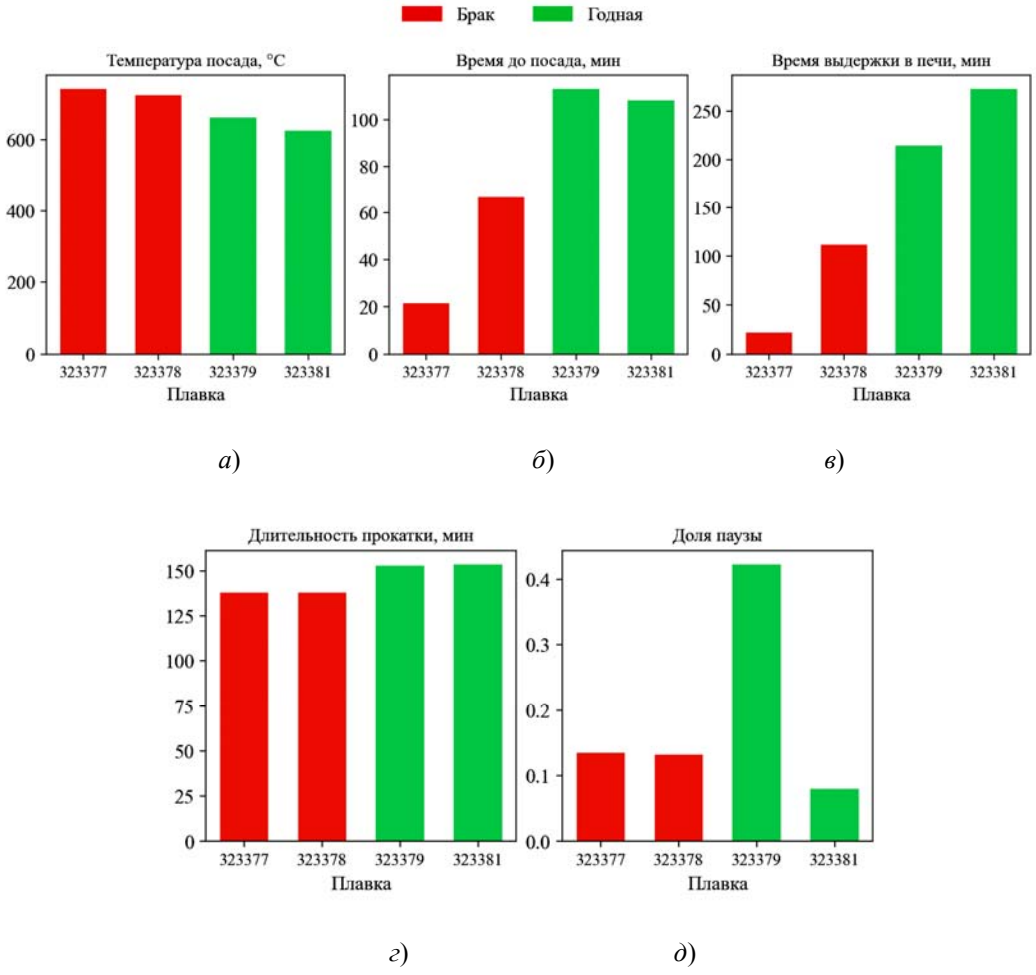
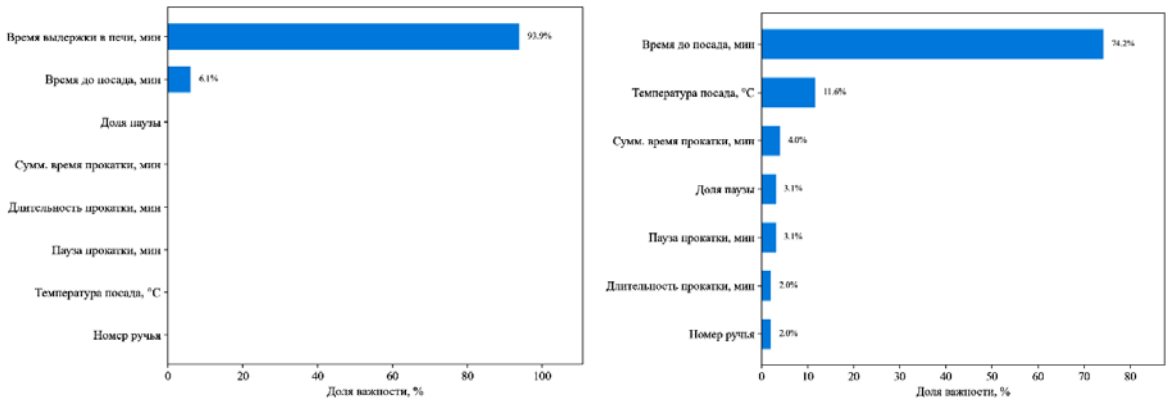


Рис. 1. Медианные профили плавок:
а – температура посада; *б* – время до посада; *в* – время выдержки в печи; г – длительность прокатки; *д* – доля паузы

Основное сравнение бракованных и годных партий выполнено на уровне плавок методом Mann-Whitney. В связи с малым объемом выборки (две плавки в каждой группе) основной акцент сделан на величине различий: стандартизованной разнице медиан, выраженной через отношение к межквартильному размаху, и направлении отклонения параметров. Дополнительно проведено сравнение по всем 92 записям; эти результаты рассматриваются как вспомогательные, поскольку строки одной плавки имеют общую метку качества и не являются статистически независимыми. По химическому составу существенных различий между группами не выявлено.

Для независимой проверки статистических выводов использована модель случайного леса на процессных признаках без включения химии, согласно методике [4]. Качество оценивалось по совокупности out-of-fold предсказаний. Получены следующие значения: сбалансированная точность – 0,713, F1-мера – 0,750, ROC-AUC – 0,742. Значимость признаков определена методом перестановочной важности. Поскольку время выдержки в печи оказывало доминирующее влияние и перекрывало близкие по смыслу параметры, дополнительно построена модель без этого признака; полученное ранжирование факторов сопоставлено со статистическим. Химия в модель не включалась: при добавлении показателей состава сбалансированная точность снизилась с 0,71 до 0,39. Машинное обучение применялось не для прогноза новых плавок, а для подтверждения согласованности выводов, полученных статистическими методами.

Анализ показывает общий технологический контраст между бракованными и годными партиями. Бракованные плавки характеризовались более коротким циклом обработки: меньшим временем в печи (медиана – 67 мин по сравнению с 244 мин у годных), меньшим временем до посада (44 и 111 мин соответственно), меньшей паузой перед прокаткой, при этом температура посада была выше (734 и 645 °C) (рис. 2, *а*).



а) *б*)

Рис. 2. Степень влияния технологических параметров на образование дефектов:
а – с учетом времени выдержки в печи; *б* – без учета времени выдержки в печи

Наиболее выраженные отличия относятся к паузе перед прокаткой, времени в печи и температуре посада. Модель без признака «время в печи» выделяет те же группы параметров: время до посада, температуру посада и показатели прокатки (рис. 2, *б*). Химический состав не проявил себя как основной фактор различия. Таким образом, брак двух рассмотренных партий по совокупности данных связан преимущественно с режимом нагрева и прокатки, а не с составом металла.

Установлено путем численного моделирования и анализа данных методом машинного обучения, что в диапазоне температур 600–650 °C происходит изменение коэффициента линейного расширения и теплоемкости стали. Это напрямую связано с перестроением кристаллической решетки γ-железа в α-железо при распаде аустенита. Это явление (рекалесценция) сопровождается выбросом тепловой энергии и существенным изменением объема стали: внешние слои расширяются незначительно,

а внутренние слои со структурой аустенита существенно расширяются в объеме. Это является причиной поверхностных продольных разрывов. При прокатке поверхностные трещины только усугубляются, образуя глубокую сетку, неисправимый зачисткой дефект. Поэтому оптимальной температурой для горячего посада НЛЗ из стали Т84S является $T \leq 600$ °С после полного окончания процесса рекалесценции.

Литература

1. Астапенко, И. В. Современные методы применения численного моделирования для решения технологических проблем горячей прокатки / И. В. Астапенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техни. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024. – С. 12–18.
2. Численное моделирование процесса прокатки трубы D 88,9 × 8 на редукционно-растяжном стане трубопрокатного агрегата ТПА 21/168 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / М. В. Оборов, И. А. Панковец, М. Н. Верещагин, И. В. Астапенко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2016. – № 3 (1395). – С. 82–86.
3. Савченко, С. А. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возная, И. В. Астапенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 52–61.
4. Астапенко, И. В. Применение искусственного интеллекта в металлургии: прогнозирование динамики охлаждения стали ШХ-15 / И. В. Астапенко, А. И. Астапенко // Проблемы современного образования в техническом вузе : материалы IX Междунар. науч.-метод. конф., Гомель, 23–24 окт. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2026. – С. 21–23.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ СФЕРОИДИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ ШХ-15 МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. И. Астапенко

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Представлены результаты исследования микроструктуры сфероидизированной стали ШХ-15 методами машинного обучения. Исследования проведены на катанке диаметром 6,5 мм. Методами машинного обучения выполнен количественный анализ размеров зерен и расстояний между ними. Определено распределение размеров и расстояний по всей площади исследуемого изображения.

Ключевые слова: подшипниковая сталь, сфероидизированная структура, мелкодисперсный перлит, машинное обучение.

Цель работы – провести количественный анализ микроструктуры катанки сфероидизированной шарикоподшипниковой стали ШХ-15 методами машинного обучения.

Поставленная цель достигается решением следующих задач: разрабатываемый алгоритм идентификации параметров зерновой структуры разбит на несколько этапов, которые выполняются последовательно:

– предварительная обработка SEM-изображений (нормализация, фильтрация, подавление шума);

– выделение глобулей цементита методом *Laplacian of Gaussian* (*LoG*);

– определение координат центров и эквивалентных диаметров глобулей;

– вычисление количественных признаков: диаметр, расстояние до ближайшего соседа, локальная плотность;

– формирование векторного представления микроструктуры для последующего анализа.

Методика исследования. Для анализа количественных данных и классификации микроструктур применены методы и алгоритмы классического машинного обучения:

– k-NN (k-ближайших соседей) – для классификации зон микроструктуры (центр/край) и оценки степени сходства структур;

– k-means – для кластеризации микроструктур по степени сфероидизации и выявления скрытых групп;

– PCA (метод главных компонент) – для снижения размерности и визуализации многомерных признаков;

– нормализация и стандартизация признаков – для корректной работы алгоритмов и повышения устойчивости классификации.

Объектом исследования в работе является микроструктура катанки сфероидизированной шарикоподшипниковой стали ШХ-15.

Катанка диаметром 6,5 мм прокатывается в линии катанки из непрерывнолитой заготовки 250 × 300 или 140 ×140 мм согласно универсальной схеме калибровки, применяемой для прокатки сортовых и арматурных профилей.

Для получения равномерной микроструктуры был разработан усовершенствованный режим поточной термообработки, способствующий снижению карбидной неоднородности: начальное поэтапное охлаждение водой (расход воды – 150–480 $м^3$/ч) до 870 °С в зоне виткообразователя и последующее охлаждение воздухом на роликовом конвейере вентиляторами с требуемой для диаметра 6,5 мм мощностью подачи воздуха [1].

Начальная температура охлаждения в зоне виткообразователя была принята равной 870 ± 20 °С (выше точки A_{c3} (A_{cm})) как наиболее эффективная для формирования мелкодисперсной структуры без образования заметной карбидной сетки и закалочных структур при разных скоростях охлаждения [2]. Были отобраны образцы и с помощью электронного микроскопа TESCAN VEGA GMS с энергодисперсионным микроанализатором AztecLive Automated Ultim Max 6 получены изображения микроструктуры.

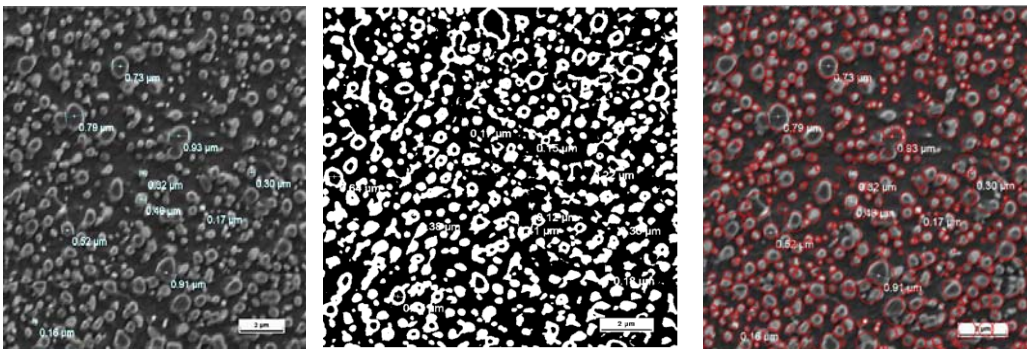
На втором этапе катанка была подвергнута циклическому сфероидизирующему отжигу маятникового типа с двумя циклами – нагрев/охлаждение [3]. Были отобраны образцы и получены изображения сфероидизированной микроструктуры.

На следующем этапе была выполнена обработка изображений. Исходные данные – фотографии сфероидизированной стали (рис. 1, *а*): светлые округлые карбидные глобулы на более темной матрице. Снимки хранятся в формате PNG с глубиной шестнадцать бит. Для обработки и вывода изображений используется линейное растяжение контраста от минимальной к максимальной яркости кадра. Масштаб задается по линейке на изображении: шестьдесят пять пикселей соответствуют двум микрометрам; все размеры и расстояния переводятся в микрометры через этот коэффициент.

Выделение глобул строится на морфологическом преобразовании white top-hat («белая шляпа»). Для каждой точки оценивается локальный фон в окрестности заданного радиуса; из яркости вычитается этот фон, и остаются только участки, за-

метно светлее окружения. Обработка выполняется в двух масштабах – с малым и большим радиусом окрестности, после чего берется больший отклик, чтобы одновременно учитывать мелкие и более крупные включения.

Далее изображение слегка сглаживается для подавления зернистого шума СЭМ и бинаризуется порогом Оцу: алгоритм по гистограмме яркостей разделяет кадр на фон и объекты с наилучшим контрастом между классами; порог слегка занижают, чтобы не пропустить менее яркие глобулы (рис. 1, *б*). Маску очищают от слишком мелких связных областей, одиночного шума и мелких разрывов внутри глобул морфологическими операциями открытия и закрытия; отбраковывают чрезмерно крупные пятна (рис. 1, *в*).

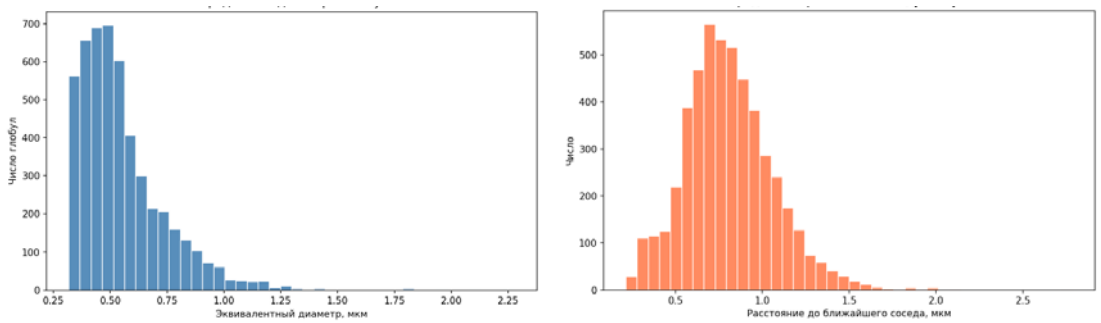


а) *б*) *в*)

Рис. 1. Этапы обработки изображений:
а – исходное; *б* – метод Оцу; *в* – сегментирование

Слипшиеся глобулы разделяют сегментацией по водоразделам: строим карту расстояния от каждого пикселя объекта до фона, находят локальные максимумы как центры включений и проводят границы по «гребням» между соседними максимумами.

Для каждой области по методике [4] вычисляют площадь, эквивалентный диаметр (диаметр круга той же площади), координаты центроида и при необходимости – округлость контура (рис. 2, *а*). Расстояние до ближайшего соседа в поле зрения определяют по центроидам всех глобул на кадре (рис. 2, *б*).



а) *б*)

Рис. 2. Количественная оценка микроструктуры:
а – распределение диаметров глобулей, мкм;
б – распределение расстояний между глобулами, мкм

Таким образом, в результате исследования выполнено следующее:

1. Разработана методика и алгоритм обработки сфероидизированной микроструктуры стали ШХ-15.

2. Построена модель обработки данных и проведено ее машинное обучение.

3. Получены количественные результаты обработки данных по размеру глобулей и расстоянию между их центрами.

Литература

1. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец, С. А. Савченко, В. И. Ввозная [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – № 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. 32–38. – DOI 10.17580/chm.2024.04.05
3. Совершенствование технологии сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко, А. Б. Сычков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова. – 2025. – Т. 23, № 1. – С. 62–72. – DOI 10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72
4. Астапенко, И. В. Применение искусственного интеллекта в металлургии: прогнозирование динамики охлаждения стали ШХ-15 / И. В. Астапенко, А. И. Астапенко // Проблемы современного образования в техническом вузе : материалы IX Междунар. науч.-метод. конф., Гомель, 23–24 окт. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2026. – С. 21–23.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА

А. И. Астапенко

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Представлены результаты исследования, методами машинного обучения, влияния технологических параметров непрерывной разливки на качество непрерывнолитых заготовок сечением 250 × 300 мм и 300 × 400 мм из рельсовых марок стали (Э76Ф, R350HT). Выполнен анализ влияния на центральную пористость и осевую ликвацию температуры разливки, тока электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе, скорости разливки и номера ручья.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, электромагнитное перемешивание; центральная пористость, осевая ликвация, температура и скорость разливки, машинное обучение.

Цель работы – провести, методами машинного обучения, анализ влияния технологических параметров непрерывной разливки на качество непрерывнолитых заготовок из рельсовых марок стали.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

– сбор технологических данных МНЛЗ-3;

– очистка данных и устранение пропусков;

– преобразование диапазонов параметров;
– формирование количественных признаков;
– нормализация и кодирование категориальных данных.

В процессе разработки технологии плавки и разливки рельсовых сталей Э76Ф и R350HT [1] был разработан технологический режим разливки, обеспечивающий получение требуемых качественных показателей. Основные параметры разливки изменялись в диапазонах, представленных в таблице.

Диапазоны изменения технологических параметров разливки

Номер ручья	Температура разливки *T*, °С	Скорость разливки υ, м/с	Ток ЭМП, А
1	1472,5–1490,0	0,3–0,9	450–550
2			
3			
4			

При освоении производства использована технология выплавки, внепечной обработки, разливки непрерывнолитой заготовки для высокоуглеродистых сталей, имеющая ограничения в части содержания алюминия [2]. Разливка по каждому корелируемому режиму завершалась отбором образцов. Оценка качественных показателей отобранных образцов осуществлялась по методике [3]. После окончания производственных мероприятий выполнен сбор массива данных и дальнейшая их обработка по методике [4].

Подготовка данных. Объектом анализа послужил массив производственных данных непрерывной разливки рельсовой заготовки ($n = 160$ наблюдений). Исходная таблица содержала многоуровневую структуру заголовков; выполнена нормализация наименований и извлечение технологических признаков: средняя температура и ее размах, скорость разливки, ток электромагнитного перемешивания по ручьям, режим мягкого обжатия, номер ручья. Целевые показатели – бинарные метки брака по центральной пористости и осевой ликвации при пороге ≥ 2 балла (в соответствии с действующей заводской классификацией). Нерелевантные и дублирующие поля исключены. С учетом ограниченного объема выборки – отказ от фиксированного разбиения «обучение-тест»; применена повторяющаяся стратифицированная k-fold-кросс-валидация (5 фолдов × 10 повторов) для устойчивой оценки качества.

Моделирование. Задача сформулирована как бинарная классификация двух независимых дефектов. Для центральной пористости использован Random Forest (A_base, без аугментации); для осевой ликвации – Extra Trees с робастной предобработкой признаков (winsorization) и SMOTE внутри обучающих фолдов. Гиперпараметры заданы умеренно жестко (ограниченная глубина деревьев) во избежание переобучения на малой выборке. Порог отнесения к классу «брак» определен по out-of-fold-предсказаниям: для пористости – по F0.5, для ликвации – по F1. По результатам моделирования определена степень влияния параметров разливки на качественные показатели непрерывнолитой заготовки (рис. 1).

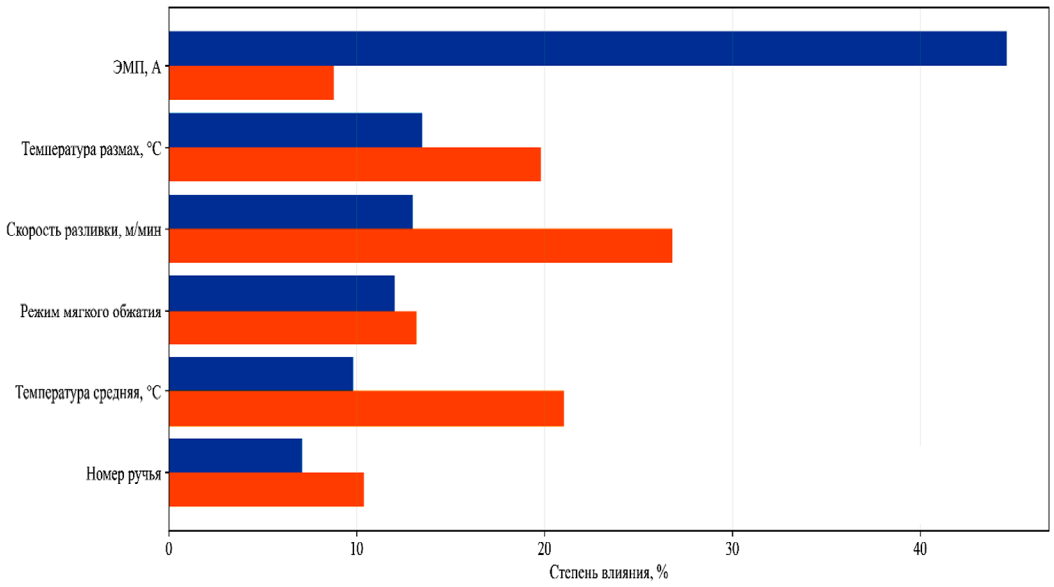


Рис. 1. Степень влияния параметров разливки
на качественные показатели:
– осевая ликвация, %; – центральная пористость, %

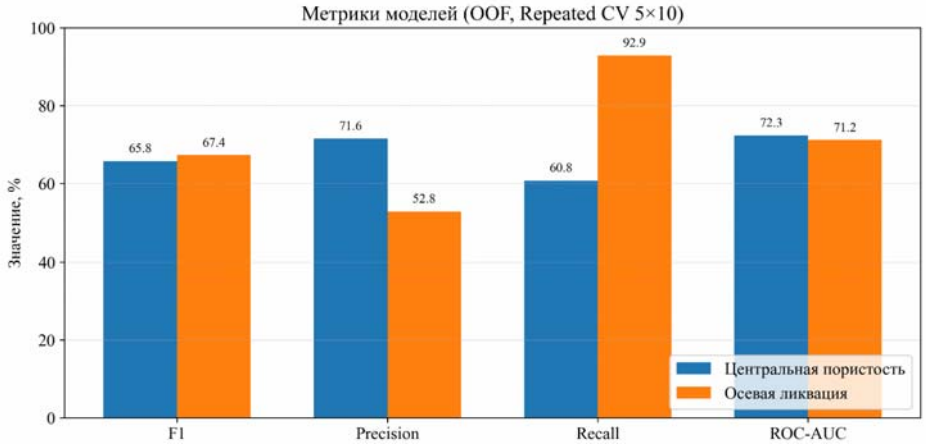
Оценка результатов исследования. Качество моделей оценено по метрикам precision, recall, F1 и ROC-AUC на OOF-выборке. Для центральной пористости: F1 ≈ 0,66; Precision ≈ 0,72; Recall ≈ 0,61; ROC-AUC ≈ 0,72. Для осевой ликвации: F1 ≈ 0,67; Precision ≈ 0,53; Recall ≈ 0,93; ROC-AUC ≈ 0,71.

Центральная пористость. Для ее прогнозирования использована модель случайного леса (Random Forest). Обучение выполнено на 160 разливках; брак учитывался при оценке от 2 баллов. По результатам перекрестной проверки модель в целом верно определяет наличие или отсутствие дефекта в около 66 % случаев. Среди заготовок, которые модель относит к браку, верный прогноз дается в 72 % случаев; выявляется 61 % всех реальных дефектов. Интегральная предсказательная способность модели – 72 % (ROC-AUC).

Осевая ликвация. Для ее прогнозирования использована модель Extra Trees (экстра-деревья) с робастной обработкой признаков и балансировкой классов в обучающей выборке. Совокупная точность классификации – около 67 %; модель обнаруживает 93 % реальных случаев ликвации. Среди заготовок, отмеченных моделью как дефектные, верно классифицировано 53 %. Интегральная предсказательная способность – 71 % (ROC-AUC).

Интерпретируемость обеспечена анализом важности признаков (feature importances): для ликвации доминируют ЭМП и режим мягкого обжатия, для пористости – скорость разливки и температурный размах. Модели позиционируются как система раннего предупреждения по параметрам разливки и не заменяют контроль качества готовой непрерывнолитой заготовки (рис. 2).

Применение методов машинного обучения в обработке данных непрерывной разливки рельсовой стали позволило установить количественные зависимости между технологическими параметрами и формированием внутренних дефектов непрерывнолитых заготовок.



а) *б*)

Рис. 2. Сравнение моделей по ключевым метрикам:
а – F1; Precision; *б* – Recall; ROC-AUC

Построенные модели показали высокую точность прогноза осевой ликвации и центральной пористости и выявили ключевые факторы, определяющие качество заготовки. Полученные результаты подтверждают возможность использования искусственного интеллекта как инструмента оптимизации режимов разливки и повышения стабильности качества рельсовой продукции.

Литература

1. Путеев, В. С. Разработка технологии производства рельсовой заготовки / В. С. Путеев, И. О. Писаренко // Сталь. – 2024. – № 9. – С. 8–14.
2. Савченко, С. А. Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитой заготовки на уровень карбидной сегрегации в бунтовом прокате из подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко // Металлург. – 2025. – № 6. – С. 17–21.
3. Савченко, С. А. Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитых заготовок на структуру и механические свойства бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко // Сталь. – 2025. – № 8. – С. 45–50.
4. Астапенко, И. В. Применение искусственного интеллекта в металлургии: прогнозирование динамики охлаждения стали ШХ-15 / И. В. Астапенко, А. И. Астапенко // Проблемы современного образования в техническом вузе : материалы IX Междунар. науч.-метод. конф., Гомель, 23–24 окт. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2026. – С. 21–23.

СЕКЦИЯ III
ЭНЕРГЕТИКА

СИСТЕМНАЯ ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ПРОМЫШЛЕННО-ОТОПИТЕЛЬНЫХ ТЭЦ

В. В. Янчук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель В. Н. Романюк

Приведены результаты оценки сокращения расхода первичного топлива в Белорусской ОЭС, а также сокращения выбросов углекислого газа при регенеративном использовании сбросных тепловых потоков на промышленно-отопительных ТЭЦ промузлов. Использование сбросной теплоты в цикле турбоустановки возможно с включением в схему абсорбционного теплового насоса, работающего на дымовых газах, отбираемых из тракта парового котла. Реализация данного решения на энергоблоках на базе турбин ПТ-60 и ПТ-70 на Новополоцкой ТЭЦ, Мозырской ТЭЦ и Гродненской ТЭЦ-2 позволит снизить потребление первичного топлива в энергосистеме на 12,8 тыс. т у. т./год при сохранении выработки тепловой и электрической энергии, а также уменьшить годовые выбросы углекислого газа на 23,3 тыс. т.

Ключевые слова: системная экономия топлива, сбросные тепловые потоки, промышленно-отопительная ТЭЦ, абсорбционный тепловой насос, паровая турбина ПТ-60.

Снижение удельных расходов топлива на выработку того же количества тепловой и электрической энергии – главная цель при повышении эффективности энергетического сектора. В Республике Беларусь в 2024 г. 62,25 % всей произведенной электроэнергии получено за счет прямого сжигания природного газа [1], что указывает на необходимость поиска способов более полного использования потенциала первичного топлива на станциях такого типа.

Работа паротурбинной электростанции невозможна без потерь теплоты, рассеиваемой в окружающую среду системой циркуляционной воды, которая имеет низкий потенциал. В проведенных ранее исследованиях [2, 3] показано, что модернизация системы регенеративного подогрева питательной воды с использованием потока теплоты, отводимой от конденсатора, позволяет повысить эффективность выработки электроэнергии по теплофикационному циклу. Данное решение требует включения абсорбционного теплового насоса (АБТН) с тепловую схему и показывает свою эффективность на промышленно-отопительных ТЭЦ со значительными невозвратами конденсата. В результате получено повышение электрического, энергетического и эксергетического КПД энергоблоков, что также позволяет повысить эффективность и устойчивость работы всей энергосистемы, то есть снизить расход топлива на выработку того же количества энергии.

Кроме энергетической эффективности при сокращении удельных расходов топлива также сокращаются и удельные выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду, снижается тепловое воздействие.

В данной работе рассмотрен вариант с включением АБТН с приводом дымовыми газами, отбираемыми из тракта парового котла, в систему регенеративного подогрева подпиточной воды энергоблока.

В качестве станций, на которых следует включать АБТН в систему подогрева питательной воды, выбраны те, на которых присутствуют значительные невозвраты конденсата – станции промузлов: Новополоцкая ТЭЦ, Мозырская ТЭЦ и Гродненская ТЭЦ-2. Исследование проводится только для турбин типа ПТ-60 и ПТ-70, установленных на данных станциях.

Тепловые и электрические нагрузки станций и время работы в данном режиме определены из статистических данных их показателей работы за 2023 г. В табл. 1 приведены средние расчетные характеристики работы турбин.

Таблица 1

Показатели работы турбин

Станция	Турбина	Средняя электрическая нагрузка, МВт	Отпуск тепловой энергии из производственных отборов, Гкал/ч	Отпуск тепловой энергии из теплофикационных отборов, Гкал/ч	Число часов работы, ч
Новополоцкая ТЭЦ	ст. № 1 ПТ-60-130/13	28,8	65,9	24,0	3960
	ст. № 2 ПТ-60-130/13	48,4	59,4	59,7	5103
Мозырская ТЭЦ	ст. № 1 ПТ-70-130/13	47,0	113,7	31,8	3655
Гродненская ТЭЦ-2	ст. № 1 ПТ-70-12,8/1,28	46,0	39,8	50,8	4051
	ст. № 2 ПТ-70-12,8/1,27	48,9	54,2	45,8	7919

Возврат конденсата производственных отборов пара на Новополоцкой ТЭЦ и Мозырской ТЭЦ отсутствует. Для Гродненской ТЭЦ-2 для отопительного периода невозврат конденсата составляет 70 %, для межотопительного – 45 %.

Расчет производился из условия сохранения пропуска пара в конденсатор до и после модернизации. Соответственно, при сохранении тепловых нагрузок станции, после модернизации системы подогрева подпиточной воды, которая подразумевает сокращение расходов пара в отборы на подогрев питательной воды, электрическая выработка снижается.

В табл. 2 приведены изменения показателей эффективности – электрического, энергетического и эксергетического КПД при реализации мероприятия [3]. Удельные значения выбросов углегислого газа при стационарном сжигании топлива рассчитаны в соответствии с национальным коэффициентом [4].

Таблица 2

Изменения показателей эффективности работы станций после модернизации

Станция	Турбина	Рост электрического КПД, %	Рост энергетического КПД, %	Рост эксергетического КПД, %	Годовая экономия топлива на станции, т у. т.	Годовое снижение выбросов углекислого газа, по станции, т
Новополоцкая ТЭЦ	ст. № 1 ПТ-60-130/13	5,3	3,4	1,2	4034	7351
	ст. № 2 ПТ-60-130/13	3,1	2,1	0,8	4340	7908
Мозырская ТЭЦ	ст. № 1 ПТ-70-130/13	5,3	4,0	1,7	7328	13353
Гродненская ТЭЦ-2	ст. № 1 ПТ-70-12,8/1,28	1,9	1,3	0,5	1726	3146
	ст. № 2 ПТ-70-12,8/1,27	1,8	1,3	0,5	3796	6918

В соответствии с инструкцией по определению эффективности использования средств, направляемых на выполнение энергосберегающих мероприятий [5], простой срок окупаемости внедрения должен составлять не более 10 лет. С учетом рекомендаций Департамента по энергоэффективности о расчетной стоимости 1 т у. т., составляющей в 2026 г. 195 долл. США [6], получено, что данные мероприятия для всех приведенных энергоблоков являются экономически эффективными. Простые сроки окупаемости мероприятий, с учетом затрат на проектирование, строительно-монтажных и пуско-наладочных работ для всех станций не превышают двух лет.

Так как выработка электроэнергии снижается в результате предлагаемой модернизации, для расчета системной эффективности в качестве замыкающей станции в энергосистеме принята КЭС с удельным расходом топлива 302,8 г у. т./кВт · ч [7].

Получено, что при реализации данного мероприятия на всех описанных станциях, системная экономия топлива составит 12,8 тыс. т у. т./год. При этом общее сокращение выбросов углекислого газа в стране при производстве того же количества энергии составит 23,3 тыс. т/год.

Литература

1. Our world in data. Electricity mix [сайт]. – Oxford, 2026. – URL: https://ourworldindata.org/electricity-mix (дата обращения: 20.01.2026).
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 абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов системы регенеративного подогрева подпиточной воды / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – № 4. – С. 343–352.
4. Экологические нормы и правила. ЭкоНиП 17.09.08-001-2024 «Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Требования (правила) количественного определения выбросов парниковых газов» : утв. Постановлением М-ва природ. ресурсов и охраны окру-

жающей среды Респ. Беларусь от 28 марта 2024 г. № 8-Т : вступ. в силу от 26 апр. 2024 г. – Минск : Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 2024. – 38 с.
5. Инструкция по определению эффективности использования средств, направляемых на выполнение энергосберегающих мероприятий : постановление М-ва экономики Респ. Беларусь, М-ва энергетики Респ. Беларусь и Ком. по энергоэффективности при Совете Министров Респ. Беларусь от 24.12.2003 № 252/45/7 // Департамент по энергоэффективности. – URL: https://energoeffect.gov.by/supervision/framework/-24122003-252457 (дата обращения: 30.01.2026).
6. Департамент по энергоэффективности. О расчетной стоимости 1 тонны условного топлива в 2026 году. – Минск, 2026. – URL: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/20250422_sprav-2 (дата обращения: 26.01.2026).
7. Департамент по энергоэффективности. Удельные расходы топлива на отпуск электро- и теплоэнергии и потери в электро- и теплосетях, используемые в 2025 году в расчетах экономии топливно-энергетических ресурсов. – Минск, 2026. – URL: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/20250217_news1 (дата обращения: 20.01.2026).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ ДОМОВ

В. Ю. Бутенко, Н. А. Кашуба

Учреждение образования «Национальный детский технопарк», г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель И. А. Жолнерович

Рассмотрена возможность совместного использования фотоэлектрических установок и тепловых насосов для тепло- и электроснабжения жилых домов. В качестве примера жилого района принимается микрорайон с малоэтажной жилой застройкой. Исследована возможность размещения солнечных панелей на крышах зданий, оценено количество вырабатываемой энергии фотоэлектрической системой в принятых условиях. Рассчитаны характеристики и количество необходимых тепловых насосов для нужд горячего водоснабжения. Оценена энергетическая и экономическая эффективность проекта.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, солнечная энергия, тепловой насос, горячее водоснабжение, фотоэлектрическая система.

Развитие возобновляемой энергетики направлено на использование экологически чистых ресурсов без вреда для окружающей среды. Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) обеспечивает местную энергетическую безопасность и снижает зависимость от поставок топлива и цен. По данным IRENA, в 2024 г. 92,5 % установленной мощности приходиться на ВИЭ. Солнечная энергия сыграла в этом значительную роль. Отопление зданий с использованием ВИЭ также быстро развивается во всем мире, и в 2025 г. его доля увеличилась до 12,6 % [1].

В современных исследованиях рассматриваются различные варианты интеграции ВИЭ с тепловыми насосами для отопления и электроснабжения домов и общественных зданий. В этих исследованиях предлагаются как методы использования солнечных тепловых коллекторов в качестве источника тепла для тепловых насосов, так и методы использования фотоэлектрического оборудования для выработки электроэнергии, которая питает тепловые насосы [2, 3]. В различных широтах эти исследования показывают разную эффективность таких систем.

В нашем исследовании рассматривается вариант использования фотоэлектрической системы как источника электроэнергии для работы компрессора теплового насоса. В качестве исходных данных был принят небольшой жилой район, состоящий из шести двухэтажных таунхаусов. Каждый таунхаус разделен на пять секций,

на каждой из которых расположены две квартиры. Средняя площадь таунхауса принимается равной 120 м^2. Исходя из предлагаемого количества зданий, общее количество квартир во всем квартале составит 60. Среднее количество человек в одной квартире – 4.

Основными компонентами фотоэлектрических систем являются солнечные панели, инвертор и аккумулятор. Солнечные панели преобразуют солнечный свет в электрическую энергию. Инвертор преобразует низковольтный постоянный ток, генерируемый солнечными панелями, в переменный ток. Аккумулятор накапливает электрическую энергию. В данной системе аккумулятор необходим для обеспечения стабильного электропитания теплового насоса.

Для размещения панелей используются крыши зданий. Поэтому при проектировании самого здания необходимо сделать крышу плоской и обеспечить легкий доступ для обслуживания солнечных панелей. Также необходимо предусмотреть технический этаж для размещения коммуникаций и аккумуляторов. Расположение солнечных панелей на одном из пяти участков таунхауса показано на рис. 1.

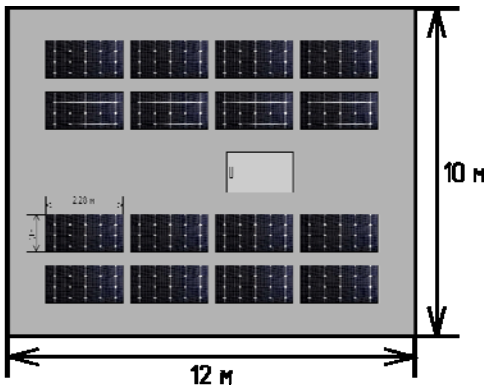


Рис. 1. Размещение солнечных панелей

Оптимальный угол наклона солнечных панелей для широты 54° составляет 48°. Исходя из среднемесячного уровня солнечной радиации в Республике Беларусь, угла наклона панелей и их общей площади (1230 м^2 для всех таунхаусов), а также общей эффективности системы (принятой за 12,9 %), такая система может генерировать в среднем 197,5 МВт · ч электроэнергии в год. В пиковый день в августе выработка составит 825 кВт · ч, а в малосолнечный день в марте – 210 кВт · ч. Для расчетов использовались данные по монокристаллическим панелям на примере панелей Longi мощностью 550 Вт.

Чтобы квартал обеспечивался горячей водой, была подобрана схема работы тепловых насосов. Работают тепловые насосы по принципу переноса низкопотенциального тепла к горячему теплоносителю, что происходит благодаря подведенному к системе электричеству. Хладагент сначала нагревается и испаряется от источника низкопотенциального тепла, после чего поступает в компрессор, сжимается и подается в конденсатор, отдавая тепло высокопотенциальному теплоносителю. Через дроссель хладагент поступает обратно в испаритель, при этом его давление снижается. Коэффициент COP, который равен отношению полученной тепловой энергии к затраченной на работу компрессора, является главным показателем эффективности теплового насоса.

Источником теплоты для теплового насоса служит воздух, вода или грунт. Последний был выбран в нашей системе. Размещение коллекторов в грунте, по кото-

рым будет циркулировать рассол и передавать тепло насосу, возможно в горизонтальном варианте, при котором коллекторами занимается большое количество площади, либо вертикально. Нами был выбран вариант с вертикальным размещением зондов, чтобы сэкономить площадь жилой застройки.

При использовании тепловых насосов для горячего водоснабжения (ГВС) в указанных условиях требуется тепловая мощность 33,6 кВт, чтобы обеспечить температуру горячей воды 55 °С и суточное потребление горячей воды в размере 60 л на человека. В этом случае можно установить шесть тепловых насосов мощностью 6 кВт, т. е. по одному тепловому насосу на таунхаус.

Для расчета коэффициента производительности (COP) и выбора хладагента мы использовали программное обеспечение SOLKANE Refrigerants 8.0. Температура испарителя была установлена на уровне 8 °С, исходя из данных о средней температуре грунта на глубине более 15 м.

Выбранный хладагент R-134a в указанных условиях показал коэффициент производительности (COP) 2,69. Следовательно, потребление электроэнергии тепловым насосом при выходной мощности 6 кВт составило 2,23 кВт. При суточном энергопотреблении теплового насоса 53,5 кВт · ч в августе, с учетом накопления электроэнергии, вырабатываемой солнечными панелями, энергии более чем достаточно. Однако при низкой интенсивности солнечного излучения в марте требуется дополнительное питание от сети.

Наглядно представление системы показано на 3D-модели (рис. 2). Обратим внимание на то, что для удобства отображения модели были приняты допущения: изображена одна секция таунхауса, длина зонда не соответствует масштабу.

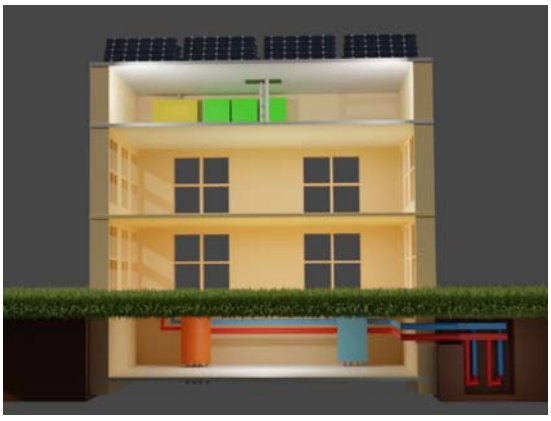


Рис. 2. 3D-модель: общий вид на секцию таунхауса

Оценка эффективности проекта показала, что простой срок окупаемости за счет экономии тепловой и электрической энергии составил 12 лет.

Для расчета теплового насоса также важно рассчитать глубину зонд. При среднем тепловом потоке грунта 50 Вт/м длина зонда для теплового насоса мощностью 6 кВт составит 75,4 м.

Таким образом, предлагаемая нами гибридная система энергоснабжения включает в себя солнечные панели, установленные на крыше, аккумуляторные батареи, а также геотермальный тепловой насос с вертикальным грунтовым теплообменником, использующим геотермальную энергию для нагрева воды. Эта система обеспечивает жилой район теплом и электроэнергией, заменяя часть традиционных источников энергии на возобновляемые.

Литература

1. Global landscape of renewable energy transition finance 2025 / International Renewable Energy Agency (IRENA). – URL: https://www.irena.org (дата обращения: 06.01.2026).
2. Sanclemente Lozano, M. Techno-economic assessment of solar hybrid system with high-temperature heat pump for industrial heat generation / M. Sanclemente Lozano, S. Trevisan, R. Guedez // SolarPACES Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3. – Article 2426. – DOI: 10.52825/solarpaces.v3i.2426. – URL: https://doi.org/10.52825/solarpaces.v3i.2426 (дата обращения: 06.01.2026).
3. Environmental benefits and economic feasibility of a photovoltaic assisted heat pump water heater / ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/388578575 (дата обращения: 06.01.2026).

ТЕПЛОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ С АККУМУЛЯТОРАМИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

К. Д. Кировский, Е. Е. Петюлевич

Учреждение образования «Национальный детский технопарк», г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель И. А. Некало

Рассмотрена эффективность совместного использования теплового аккумулятора с теплонасосными установками.

Ключевые слова: теплонасосные установки, тепловые аккумуляторы, эффективность, COP.

В Республике Беларусь энергосбережение и переход на возобновляемые источники энергии становятся приоритетными задачами [1]. Одним из наиболее перспективных решений в этой области является использование теплонасосных установок (ТНУ), способных эффективно трансформировать низкопотенциальное тепло окружающей среды для нужд отопления и горячего водоснабжения [2].

Теплонасосные установки принято классифицировать по принципу действия (парокомпрессионные, адсорбционные, абсорбционные) или по источнику тепловой энергии низкого потенциала [2]. В данной работе будут рассмотрены парокомпрессионные ТНУ, использующие воздух, как низкопотенциальный источник энергии. Принципиальная схема ТНУ типа «воздух – вода» представлен на рис. 1.

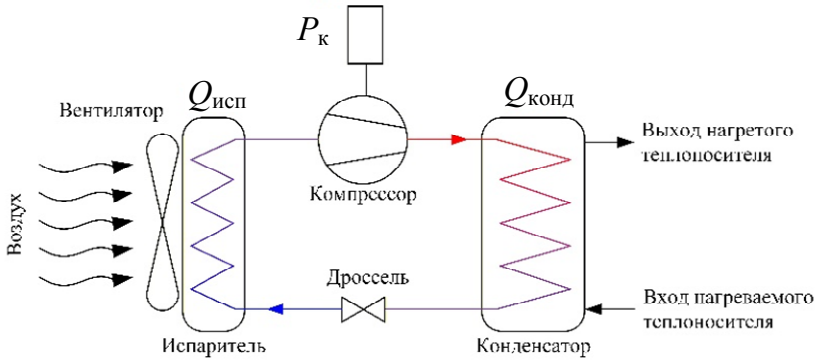


Рис. 1. Принципиальная схема ТНУ типа «воздух – вода»
Примечание. Собственная разработка автора.

Главным недостатком данного типа ТНУ является его низкая эффективность при слишком низких температурах наружного воздуха. На лабораторном стенде «Тепловой насос» в Национальном детском технопарке была получена зависимость мощности компрессора ТНУ от температуры низкопотенциального источника (рис. 2).

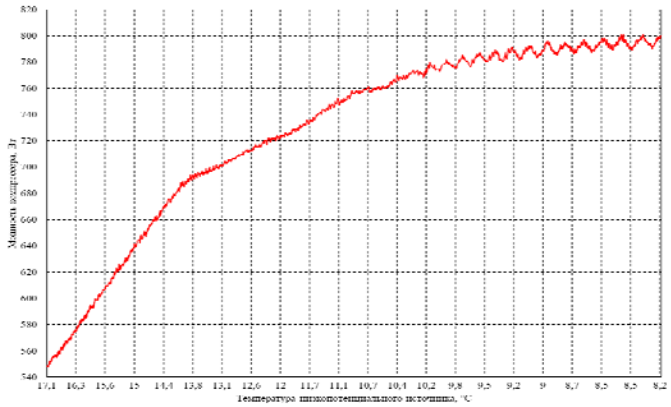
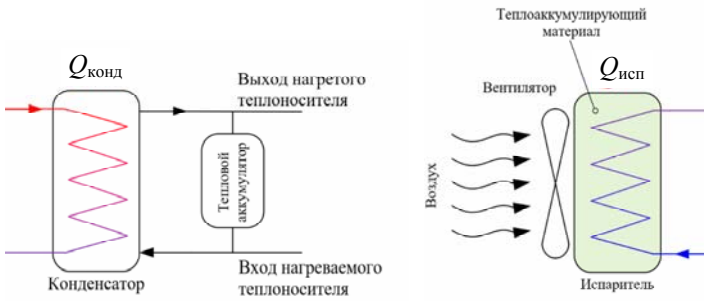


Рис. 2. Зависимость мощности компрессора ТНУ
от температуры низкопотенциального источника энергии
Примечание. Собственная разработка автора.

Чем больше перепад между температурами наружного воздуха и требуемой температуры в конденсаторе, тем будет ниже коэффициент преобразования COP [2]. Еще одним недостатком воздушных ТНУ является их обледенение в холодном и влажном климате, что также приводит к снижению коэффициента COP [2, 3–5].

Решением двух вышеизложенных недостатков воздушных ТНУ будет применение тепловых аккумуляторов (ТА). Тепловые аккумуляторы могут выполняться в виде бака-аккумулятора воды (бойлер) или кожухо-трубной, капсульной системы, в которые будет запечатан теплоаккумулирующий материал [6]. На рис. 2 представлены два схемных решения внедрения теплового аккумулятора.



а) *б*)

Рис. 3. Схемные решение внедрения теплового аккумулятора:
а – ТА после конденсатора; *б* – ТА внедренный в испаритель
Примечание. Собственная разработка автора.

Схемное решение на рис. 3, *а* предполагает использование бака-аккумулятора для нагрева воды в период максимально высокой температуры наружного воздуха. Однако максимальная температура наружного воздуха совпадает с временем высокого тарифа на электроэнергию, поэтому эффективность данного решения нивелируется периодом высокой стоимости электроэнергии (при условии дифференциальных тарифов на электроэнергию).

В случае второго схемного решения (рис. 3, *б*) предлагается внедрить теплоаккумулирующий материал с испарителем ТНУ, что позволит сохранить высокую температуру для испарителя и повысить коэффициент COP.

На рис. 2 наблюдается линейная зависимость роста мощности на компрессоре ($P_{эл}$) (от снижения температуры окружающего воздуха (T). Линейная зависимость будет рассматриваться приближенно по формуле

$$P_{эл}(T) = aT + b.$$

Примем, что при температуре окружающего воздуха в 17 °С мощность компрессора составит 550 Вт, а при 8 °С – 800 Вт (рис. 2), тогда коэффициент a будет равен:

$$a \approx \frac{800 - 550}{8 - 17} = -27{,}8 \text{ Вт/}^{\circ}\text{С}.$$

То есть при понижении температуры на 1 °С мощность возрастает примерно на 28 Вт.

Для количественной оценки эффективности работы ТНУ до и после модернизации используется расчет коэффициента преобразования COP по формуле

$$\text{COP}(T) = Q_{конд} / P_{эл}(T),$$

где $Q_{конд}$ – тепловая нагрузка, отбираемая от конденсатора ТНУ, кВт.

Сравнение значений COP, полученных для базовой и модернизированной конфигураций (рис. 3, *б*), позволяет сделать вывод об энергетической эффективности проведенных изменений.

Представим линейное приближение изменения коэффициента COP от температуры наружного воздуха в программе Microsoft Excel для ТНУ теплопроизводительности 10 кВт:

$$\text{COP}(T) = 2{,}4615 + 0{,}0769T.$$

Для использования ТНУ в качестве теплоисточника для нагрева воды в системе водоснабжения здания, необходимо соблюсти санитарные нормы – температура воды не ниже 50 °С, во избежания образования бактерий легионеллы [7].

Расчет проводился с наибольшим перепадом (ΔT) между ночной (min) и дневной (max) температурой наружного воздуха за период 2024 и 2025 гг. (г. Минск). Результаты расчета занесены в таблицу.

Результаты расчета эффективности модернизации ТНУ

Месяц	ΔT, °C	COP_{max}	COP_{min}	$COP_{без\ ТА}$	Экономия, %
Май	7,90	4,05	3,44	3,74	8,12
Июнь	6,54	4,25	3,74	3,99	6,30
Июль	6,26	4,40	3,92	4,16	5,79
Август	7,33	4,39	3,83	4,11	6,85
Сентябрь	8,75	4,26	3,58	3,92	8,58
Октябрь	3,59	3,30	3,03	3,16	4,36
Ноябрь	1,16	2,74	2,65	2,69	1,65
Декабрь	0,95	2,57	2,49	2,53	1,44
Январь	1,08	2,61	2,53	2,57	1,62
Февраль	3,68	2,38	2,10	2,24	6,32
Март	5,40	3,13	2,71	2,92	7,11
Апрель	6,89	3,53	3,00	3,26	8,12

Применение ТА на испарителе повышает COP и снижает потребление электроэнергии при заряде теплового аккумулятора днем и разряде в ночь. Однако данные показатели незначительны, особенно в зимний период, где суточный температурный диапазон составляет не более 5 °C.

Литература

1. О Государственной программе «Устойчивая энергетика и энергоэффективность» на 2026–2030 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 22 янв. 2026 г., № 30 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by (дата обращения: 01.04.2026).
2. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре : информ.-метод. изд. / Е. Г. Гашо, С. А. Козлов, В. С. Пузаков [и др.]. – М. : Перо, 2016. – 204 с.
3. The Future of Heat Pumps in China / International Energy Agency, Tsinghua University Building Energy Research Center. – Paris : IEA, 2024. – 153 p.
4. Rethinking peak load in district heating: Operational insights and techno-economic pathways / H. Ali, A. Volkova, A. Dedov, S. Moser // Energy Reports. – 2026. – Vol. 15. – Art. 109061. – DOI 10.1016/j.egyr.2026.109061
5. Air-source ammonia heat pump for district heating: a field modeling approach with focus on frosting-defrosting cycles / A. F. Passarelli, U. Merlo, F. Pelella [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2026. – Vol. 282, 128790. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2025.128790
6. Петюлевич, Е. Е. Исследование теплоаккумулирующих материалов: парафин и тригидрат ацетат натрия / Е. Е. Петюлевич, В. В. Драбко // Молодой ученый : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч., Пенза, 15 авг. 2025 г. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2025. – Т. 15. – С. 55–61. – EDN INOUHU.
7. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации систем централизованного горячего водоснабжения : санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы : утв. Постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 30 дек. 2009 г. № 142. – Минск, 2009. – 32 с.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ КАК НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

А. В. Берсенев

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск

Научный руководитель А. И. Зеленькевич

Рассмотрены особенности функционирования вакуумных индукционных печей с точки зрения их влияния на качество электроэнергии. Приведен анализ электрических характеристик печи как нелинейного приемника, описаны процессы, вызывающие появление гармонических искажений в питающей сети, и возможные пути их компенсации. Отмечена роль тиристорных преобразователей частоты в формировании спектра токов высших гармоник и предложены общие рекомендации по повышению энергоэффективности и электромагнитной совместимости таких установок.

Ключевые слова: вакуумная индукционная печь, нелинейная нагрузка, гармоники, тиристорный преобразователь частоты, качество электроэнергии.

Термическая обработка в вакууме и методы вакуумной плавки в настоящее время достаточно широко применяются для создания материалов, получение которых другим способом достаточно проблематично. Плавка в вакууме позволяет предохранять расплавляемый металл от взаимодействия с окружающей средой. Вакуумирование плавильного пространства позволяет значительно улучшить механические и литейные свойства высоколегированных сталей, специальных сплавов, которые из-за наличия легкоокисляемых элементов склонны к образованию значительного количества оксидных пленок. При вакуумной плавке концентрация примесей в жидком металле понижается за счет прохождения такого процесса, как, например, дегазация, если концентрация газов, растворенных в металле, зависит от давления окружающей среды.

Вакуумная печь для индукционной плавки (ВИП) − это система, включающая в себя герметичную камеру, в которой устанавливаются индукционная тигельная печь и в ряде случаев литейная форма [1]. Следует отметить, что в последнее время в мировом литейном производстве отмечается тенденция получения высокотехнологичных легированных материалов. В такое производство в мировом масштабе инвестируется все больше капитальных вложений. Поэтому основополагающий процесс для большинства всех производителей высоколегированных сплавов – вакуумная индукционная плавка, которая особенно хорошо подходит для плавки и получения литья из железа, черных металлов, никеля, кобальта и их сплавов в вакууме и контролируемой атмосфере для удовлетворения требований промышленного производства. Когда качество материала чрезвычайно важно, конструкция вакуумных печей для индукционной плавки и литья позволяет легко и быстро достигать необходимых результатов, обеспечивая заказчиков продукцией необходимого качества.

При всех своих технологических преимуществах у ВИП есть и существенные недостатки с точки зрения влияния на качество электроэнергии в точке присоединения с электрической сети. Цель данного исследования – изучить особенности электрических параметров вакуумной индукционной печи, анализируя ее как нелинейную нагрузку, и определить влияние факторов на работу системы.

Рассмотрим особенности работы вакуумной индукционной печи как нелинейной нагрузки. В процессе плавления металл меняет свои магнитные и электрические свойства, из-за чего активное сопротивление нагрузки нелинейно зависит от темпе-

ратуры. Также вакуумная индукционная печь является нелинейной нагрузкой из-за использования силовых преобразователей частоты (тиристорных/транзисторных), что вызывает гармонические искажения тока и напряжения. Тиристорный инвертор токового типа обладает свойством прерывистого протекания тока, зависящего от угла управления. При изменении нагрузки, особенно в динамических режимах плавки, угол открытия тиристоров варьируется, и форма токовой кривой искажается. В цепи появляются гармоники 5-й, 7-й, 11-й и более высоких порядков, сумма которых формирует результирующую несинусоидальную форму сигнала.

Исследования показывают, что высокое содержание гармоник приводит к нагреву трансформаторов, снижению срока службы конденсаторных установок и возрастанию потерь в линиях. Особенно чувствительны к этому автономные или ослабленные сети, характерные для промышленных предприятий.

Дополнительным фактором является емкостное и индуктивное взаимодействие элементов в контуре печи, так как колебательная цепь может вступать в резонанс с высшими гармониками, усиливая блуждающие токи и создавая дополнительные помехи. В условиях вакуумной плавки, где требования к надежности и стабильности питания высоки, эти эффекты требуют особого внимания.

Моделирование в *MATLAB/Simulink* и специализированные пакеты моделирования (*Micro-Cap*, *PSpice*) позволяют оценить влияние изменения параметров нагрузки и настроек преобразователя на форму токов и напряжений, а также подобрать оптимальные схемы фильтрации и стабилизации.

Одним из направлений повышения стабильности работы печей является параметрическая стабилизация мощности индуктора, основанная на адаптивном управлении контуром в зависимости от изменения электрических свойств расплава.

Элементы активной фильтрации и компенсационные устройства позволяют снизить уровень гармоник и улучшить электромагнитную совместимость с сетью. Комбинирование *LC*-фильтров с системами активной компенсации реактивной мощности (*STATCOM*, *AQC*) обеспечивает наиболее устойчивый результат при работе мощных индукционных установок.

Для уменьшения негативного влияния вакуумных индукционных печей на энергосистему целесообразно: применять тиристорные преобразователи с мягким коммутационным режимом, снижающим переключательные перенапряжения; использовать активные фильтры и управляемые компенсаторы реактивной мощности для подавления гармоник; обеспечивать согласование мощности печей с трансформаторами через согласующие реакторы; в качестве способа регулирования мощности печи использовать частотно-импульсную модуляцию выходного напряжения.

Известно, что последовательный резонансный контур потребляет из источника максимум мощности при частотах, близких к его резонансной частоте. Принцип регулирования строится на том, что при уходе в сторону от резонансной частоты растет импеданс контура, вследствие чего он потребляет меньшую мощность. Для тиристорных преобразователей частоты используется регулирование в области частот ниже резонансной, ведь они и так работают на предельных частотах, в то время как для транзисторных преобразователей допустимо регулирование в области частот выше резонансной. При частотах выше резонансной транзистор включается до достижения током нулевого значения, когда его обратный диод является проводящим. Подобное включение является благоприятным для транзистора, ведь не возникает сквозных токов через открывающийся транзистор и обратный диод [2].

Также целесообразно внедрять интеллектуальные системы мониторинга качества электроэнергии, которые позволяют в режиме реального времени контролировать коэффициент искажения тока (*THD*) и использовать цифровые регуляторы мощности, поддерживающие оптимальный ток в индукторе при изменении свойств расплава.

Комплексное применение указанных мер позволяет не только обеспечить нормативное качество электроэнергии, но и продлить срок службы силового оборудования.

С целью выявления закономерности изменения спектра гармоник в зависимости от мощности и режимов работы, что позволит оптимизировать параметры управления для минимизации искажений, на одном из производственных предприятий г. Барановичи планируется проведение исследований работы вакуумных индукционных печей типа 791 марки TAV (рис. 1). Данный тип закалочного оборудования может использоваться в качестве плавильной печи при условии использования плавильного тигля и литейной формы.

Рис. 1. Вакуумная печь тип 791 марки TAV для термообработки различных изделий из металла

В ходе исследований планируется установить характер нелинейности вакуумной индукционной печи, уровни и спектр эмиссии гармоник токов и искажений напряжений при различных режимах нагрева.

Вакуумная индукционная печь представляет собой сложный электрофизический объект, сочетающий высокоточные технологические процессы и существенное воздействие на энергосистему. Повышение эффективности функционирования таких установок требует комплексного подхода: оптимизации схемных решений, применения активных фильтров и адаптивного управления мощностью. Это обеспечивает стабильность плавильного процесса, энергосбережение и электромагнитную совместимость с сетью предприятия.

Литература

1. Вакуумные индукционные плавильные печи. – URL: https://consarc.com/product_categories/vacuum-induction-melting-furnaces-vim/ (дата обращения: 03.04.2026).
2. Патент RU157187 U1, МПК H02M 5/00 (2006.01). Устройство управления перестраиваемым инвертором тока для индукционного нагрева при сильно изменяющейся нагрузке : опубл. 07.12.2017, бюл. № 34 / Кувалдин А. Б., Федин М. А., Генералов И. М., Кулешов А. О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ И ЦЕТАНОВОГО ЧИСЛА ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ДИЗЕЛЬНЫХ ДИСТИЛЛЯТОВ

М. А. Ареховская

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Одними из ключевых показателей, характеризующих пригодность топлива к использованию в энергетических установках, являются его воспламеняемость и способность к устойчивому горению. В данной работе проведено исследование влияния добавок дизельного дистиллята вторичной перегонки на температуру вспышки и температуру воспламенения печного бытового топлива, а также выполнен анализ цетанового числа топливных композиций.

Ключевые слова: печное бытовое топливо, дизельные дистилляты, температура вспышки, температура воспламенения, цетановое число.

Исходным компонентом выступает печное бытовое топливо (ТУ BY 400091131.004-2009). В качестве модифицирующей добавки использовался дизельный дистиллят вторичной перегонки. Путем интенсивного механического перемешивания были приготовлены топливные композиции с содержанием дистиллята от 10 до 50 %. Определение температуры вспышки и воспламенения проводилось в открытом тигле согласно стандартной методике. Сущность метода заключается в фиксации температуры, при которой пары нагреваемого нефтепродукта образуют с воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении пламени. Температура воспламенения фиксировалась при условии устойчивого горения образца в течение не менее 5 секунд после удаления источника зажигания.

Результаты исследования воспламеняемости, представленные в таблице.

Температура вспышки и воспламенения топливных композиций при добавлении дизельного дистиллята вторичной перегонки

Количество добавленного дистиллята, мл	Температура вспышки, °С	Температура воспламенения, °С
Без добавления	116,08	133,2
10	106,6	121,4
20	104,7	115,3
30	102,8	110,9
40	95,05	101,6
50	87,3	92,3

Для чистого печного бытового топлива (ПБТ) температура вспышки составила 116,8 °С, а температура воспламенения – 133,2 °С. Добавление дизельного дистиллята вторичной перегонки приводит к закономерному уменьшению этих показателей. При введении 10 мл дистиллята температура вспышки снижается до 106,6 °С, а при увеличении концентрации до 50 мл – до 87,3 °С. Аналогичная динамика наблюдается и для температуры воспламенения, которая в диапазоне концентраций от 0 до 50 % уменьшается с 133,2 до 92,3 °С.

Выявленное снижение температуры вспышки объясняется изменением фракционного состава топливной смеси. Дизельный дистиллят вторичной перегонки содержит более легкие компоненты с меньшей молекулярной массой по сравнению с базовым печным бытовым топливом. Повышение концентрации легких фракций способствует увеличению испаряемости топлива: оно образует больше паров при более низких температурах.

С технологической точки зрения, использование топлива с пониженной температурой вспышки имеет как положительные, так и отрицательные аспекты. К положительным факторам можно отнести снижение энергозатрат на инициирование процесса горения, поскольку для воспламенения паровоздушной смеси требуется подвод меньшего количества тепла. Это может повысить экономичность розжига топлива в горелочных устройствах.

Отрицательным фактором является повышение пожароопасности топливной композиции. Более легкое испарение означает, что при нарушении герметичности системы хранения или подачи топлива возрастает риск образования взрывоопасных паровоздушных смесей. В связи с этим при практическом использовании топлив на основе дизельных дистиллятов необходимо строгое соблюдение мер предосторожности: контроль герметичности оборудования, недопущение открытого огня в зонах хранения и обеспечение надежной вентиляции.

Важно отметить, что, несмотря на снижение, полученные значения температуры вспышки (87,3–116,8 °С) остаются выше аналогичных показателей для мазута (110 °С) и значительно превышают нормативные требования, предъявляемые к дизельному топливу (не ниже 55 °С для летних сортов). Это позволяет сделать вывод о сохранении приемлемого уровня безопасности при эксплуатации исследованных топливных композиций.

Снижение температуры вспышки свидетельствует о повышении испаряемости топливной композиции. Это объясняется тем, что дизельный дистиллят вторичной перегонки содержит более легкие фракции по сравнению с исходным печным бытовым топливом. С технологической точки зрения, использование топлива с более низкой температурой вспышки позволяет затрачивать меньше энергии на инициирование процесса горения, что может повысить экономичность розжига.

Однако снижение температуры вспышки также влечет за собой повышение пожароопасности топлива, что требует строгого соблюдения мер безопасности при хранении и транспортировке.

Несмотря на уменьшение, все полученные значения температур вспышки остаются выше аналогичных показателей для мазута (110 °С) и значительно выше нормативных требований для дизельного топлива (не ниже 55 °С для летних сортов и 40 °С для зимних). Это подтверждает сохранение эксплуатационной безопасности композиций на основе ПБТ.

Цетановое число является косвенной характеристикой воспламеняемости дизельных топлив, однако для печных и котельных топлив оно не нормируется. Тем не менее, анализ фракционного состава и температурных характеристик позволяет сделать вывод о влиянии добавки дистиллята на самовоспламеняемость смеси.

Поскольку добавление дизельного дистиллята снижает вязкость и плотность композиции можно увидеть улучшение процесса смесеобразования. Более легкие и однородные по составу капли, образующиеся при распылении такого топлива, быстрее испаряются, что способствует более полному и устойчивому сгоранию.

Литература

1. Морозова, О. Ю. Резервное топливоснабжение котельных РУП «Гомельэнерго», работающих в пиковом режиме / О. Ю. Морозова ; науч. рук. А. В. Шаповалов, Н. З. Заглубоцкий // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / 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, 2020. – С. 142–145.
2. Соловей, Е. В. Печное бытовое топливо – новый вид резервного топлива в энергосистеме Республики Беларусь / Е. В. Соловей, И. О. Шамело ; науч. рук. О. Ю. Морозова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 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, 2022. – С. 220–223.
3. Ковальчук, А. А. Влияние вторичной перегонки на свойства печного бытового топлива и его смеси сэтанолом / А. А. Ковальчук, Е. Н. Макеева // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 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, 2023. – С. 255–258.

ТРИГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА И ИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

В. В. Сиваков, И. К. Журавлев

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Рассмотрены термодинамические основы тригенерационных установок на диоксиде углерода (CO_2) как едином рабочем теле. Представлена схема утилизации вторичных энергоресурсов для совместной выработки электроэнергии, тепла и холода, а также получения товарной углекислоты. Описана парогазовая установка с котлом-утилизатором и двойным промежуточным перегревом, объединяющая цикл Брайтона и цикл Ренкина на CO_2. Показано, что использование CO_2 позволяет повысить экологичность системы, снизить затраты и улучшить эффективность за счет глубокой утилизации тепла отходящих газов. Двойной перегрев увеличивает работу расширения и предотвращает попадание влажной фазы в проточную часть турбины. Научная новизна заключается в разработке сопряженных прямого и обратного циклов на одном хладагенте. Практическая значимость подтверждается возможностью производства холода на двух температурных уровнях, тепла, электричества и жидкого CO_2.

Ключевые слова: тригенерация, диоксид углерода (CO_2), вторичные энергоресурсы, парогазовая установка, двойной промежуточный перегрев, утилизация тепла.

Термодинамические основы тригенерации на CO_2

CO_2-тригенерация: электричество, тепло и холод в одной установке через прямые и обратные циклы с единым хладагентом.

Установка на вторичных энергоресурсах (ВЭР)

Установка утилизирует тепло отходящих газов для тригенерации (электричество, тепло, холод) и выдачи товарного CO_2. Особенность – единое рабочее тело (CO_2) во всех контурах.

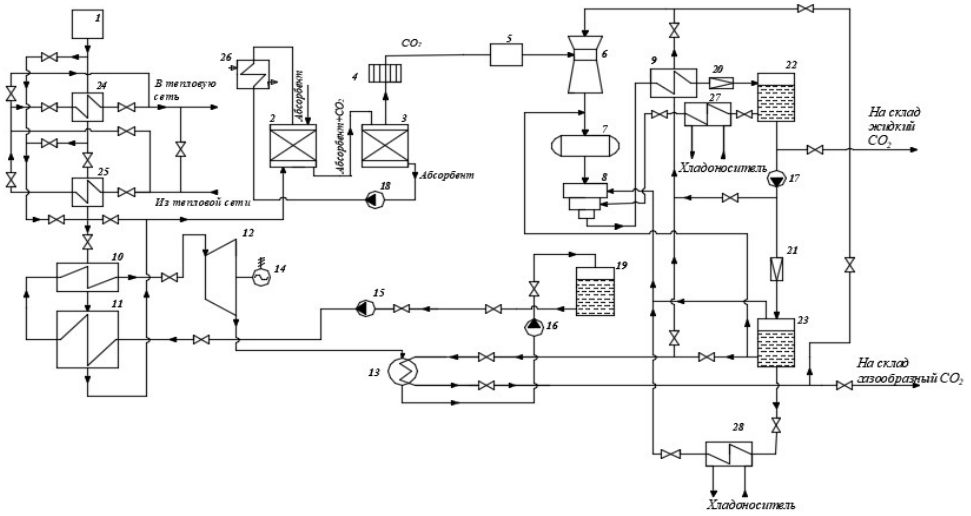


Рис. 1. Схема тригенерационной турбодетандерной установки на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты:
1 – источник продуктов сгорания (ВЭР); *2* – абсорбер; *3* – десорбер;
4 – брызгоотделитель; *5* – осушитель; *6* – инжектор; *7* – ресивер;
8 – компрессор; *9* – конденсатор; *10* – перегреватель; *11* – испаритель;
12 – паровая турбина; *13* – конденсатор; *14* – электрогенератор; *15–18* – насос;
19 – сборник; *20*, *21* – регулирующий вентиль; *22* – сепаратор 1;
23 – сепаратор 2; *24–26* – теплообменник; *27*, *28* – испаритель

Источник тепла и система улавливания CO_2

Установка: дымовые газы охлаждаются в теплообменниках (24, 25), нагревая сетевую воду. Охлажденные газы идут в абсорбер (2) – абсорбент связывает CO_2, чистый газ выбрасывается. Насыщенный абсорбент – в десорбер (3), где с подводом тепла выделяется чистый CO_2, а регенерированный абсорбент возвращается в цикл.

Подготовка и компримирование углекислоты

CO_2 из десорбера очищается в брызгоотделителе (4) и осушителе (5), затем через инжектор (6) поступает в ресивер (7). Трехступенчатый компрессор (8) с промежуточным охлаждением сжимает его до 70–100+ бар.

Холодильный цикл и получение низких температур

Конденсатор (9) охлаждает и конденсирует CO_2. Двухступенчатое дросселирование с сепарацией:

1. Дроссель (20) → давление P_{01} → сепаратор (22): пар на среднюю ступень компрессора (8), жидкость на дроссель (21).

2. Дроссель (21) → давление P_0 → сепаратор (23): пар на вход 1-й ступени компрессора (8), жидкость (T_0) в конденсатор-испаритель (13) турбодетандерного контура. Газ из (13) возвращается в инжектор (6).

Для тригенерации — испарители (27, 28) на двух температурных уровнях.

Турбодетандерный контур (генерация электроэнергии)

Насос (16) подает жидкий CO□ из ресивера (19) в испаритель (11) и перегреватель (10) – тепло ВЭР испаряет и перегревает рабочее тело. Пар расширяется в турбине (12) с генератором (14). Отработавший пар конденсируется в конденсаторе (13), отдавая тепло холодильному контуру, конденсат возвращается в ресивер (19).

Анализ термодинамического цикла

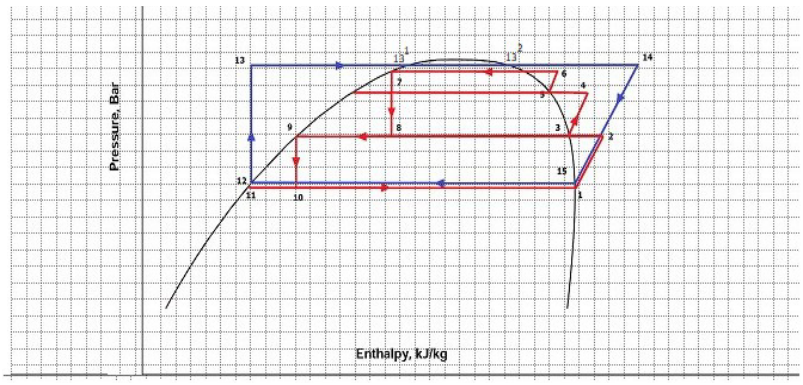


Рис. 2. Цикл турбодетандерной тригенерационной установки на диоксиде углерода

Сопряжение двух циклов на CO_2:

1. Прямой цикл (турбодетандерный): насос (12–13) → нагрев от ВЭР (13–14) → → турбина (14–15) → конденсация (15–12) с отводом тепла в обратный цикл.

2. **Обратный цикл (холодильный):** трехступенчатое сжатие (1–2,3–4,5–6) → → конденсация (6–7) → двухступенчатое дросселирование с сепарацией (7–8–9–10) → → кипение (10–1) в конденсаторе-испарителе.

Взаимодействие: теплота конденсации прямого цикла (15–12) отдается кипящему CO_2 обратного цикла (10–1).

Парогазовая установка (ПГУ) с двойным перегревом

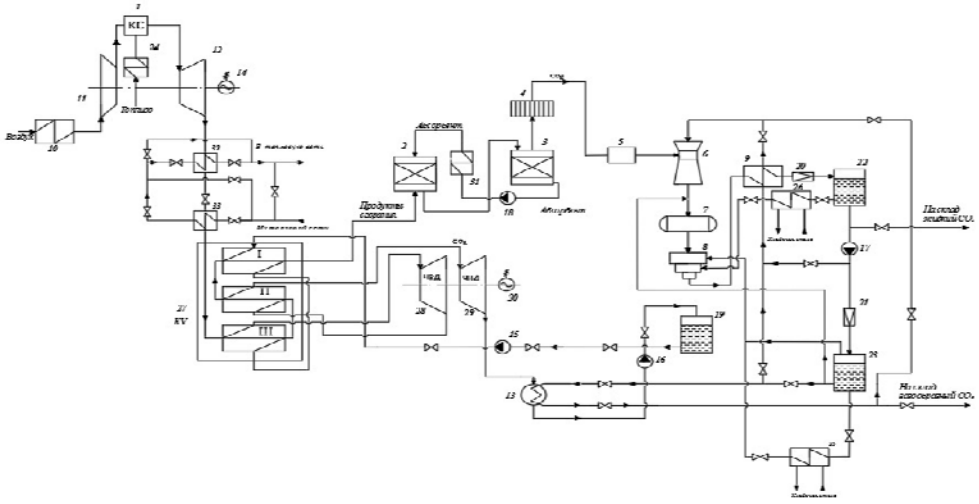


Рис. 3. Схема тригенерационной парогазовой турбодетандерной установки с котлом утилизатором:
1 – камера сгорания; *2* – абсорбер; *3* – десорбер; *4* – брызгоотделитель; *5* – осушитель; *6* – инжектор; *7* – ресивер; *8* – компрессор; *9* – конденсатор; *10* – воздухоподогреватель; *11* – турбокомпрессор; *12* – газовая турбина; *13* – конденсатор-испаритель; *14*, *30* – электрогенератор; 15–18 – насос; *19* – сборник; *20*, *21* – регулирующий вентиль; *22* – сепаратор 1; *23* – сепаратор 2; *24*, *31–33* – теплообменник; *25*, *26* – испаритель; *27* – котел утилизатор; *28*, *29* – ЧВД и ЧНД турбины соответственно

Гибрид: цикл Брайтона (ГТУ) + цикл Ренкина на CO_2 с двойным перегревом. Утилизация тепла выхлопных газов ГТУ в котле-утилизаторе повышает теплоперепад и мощность.

Газотурбинная надстройка (высокотемпературный контур)

Воздух подогревается в (10), сжимается в (11) → камера сгорания (1) с топливом. Продукты сгорания расширяются в газовой турбине (12), приводя компрессор и генератор (14). Отработавшие газы (450–600 °C) идут в котел-утилизатор.

Термодинамический анализ цикла с двойным перегревом

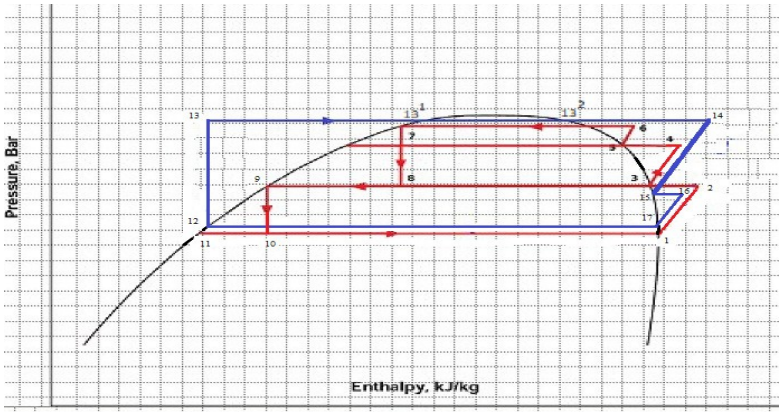


Рис. 4. Цикл турбодетандерной тригенерационной установки на диоксиде углерода с двойным перегревом

Двойной перегрев в цикле Ренкина на CO_2: насос (12–13) → испарение ($13–13^1–13^2$) → первый перегрев ($13^2–14$) → ЧВД (14–15) → второй перегрев (15–16) → → ЧНД (16–17) → конденсация (17–12). Без второго перегрева — расширение 14–15' (меньше работа, риск влажности). Промежуточный перегрев смещает конечную точку (17) в область перегретого/сухого насыщенного пара, повышая работу и безопасность.

Научная новизна: схемы тригенерации на CO_2 как едином рабочем теле, включая варианты с двойным перегревом в парогазовых циклах. Практическая значимость: утилизация сбросного тепла, улавливание CO_2 из дымовых газов, тригенерация (электричество, тепло, холод), получение товарной углекислоты → повышение рентабельности.

Литература

1. Преимущества CO_2 в холодильной технике / По материалам JARN // Холодильная техника. – 2016. – № 3. – С. 25.
2. Современные альтернативные хладагенты на длительную перспективу и их возможные области применения / По материалам JARN // Холодильная техника. – 2016. – № 6. – С. 4–9.
3. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 295 с.
4. Кудинов, А. А. Двукратный промежуточный перегрев водяного пара в зоне высоких температур и в хвостовой части трехконтурного котла утилизатора /А. А. Кудинов, К. Р. Хусаинов // Промышленная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 21–27.
5. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник, Н. А. Вальченко, П. А. Ковальчук, А. И. Аршуков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2019. – № 2. – С. 41–51.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

А. В. Кононович, Б. В. Чернейко

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

Научный руководитель Н. М. Кидун

Проведен анализ современных методов прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса полиэтиленовых газопроводов. Рассмотрены технические характеристики труб ПЭ80 и ПЭ100, механизм медленного роста трещин (SCG), методы диагностики (визуальный контроль, УЗК, Smart Pigging, георадарное зондирование). Получено уравнение длительной прочности для прогнозирования остаточного ресурса. Выполнен сравнительный анализ регламентного подхода СНГ и риск-ориентированного подхода ЕС. Показана необходимость перехода к оценке фактического технического состояния газопроводов.

Ключевые слова: полиэтиленовые газопроводы, прогнозирование ресурса, медленный рост трещин, техническая диагностика, Smart Pigging, георадарное зондирование, MRS, SDR, цифровые двойники.

Газораспределительный комплекс Республики Беларусь характеризуется массовым внедрением труб из полиэтилена низкого давления (ПНД). От 90 до 95 % вновь строящихся распределительных сетей выполняются из полимерных материалов, обусловленных стойкостью к коррозии, химической инертностью и экономичностью монтажа. Нормативный срок службы составляет 50 лет, однако реальная долговечность зависит от температурных перепадов, УФ-излучения, механических нагрузок и грунтовых вод. С приближением первых партий ПЭ труб к предельному сроку службы, объективная оценка их технического состояния становится приоритетной задачей.

Для газораспределительных сетей Беларуси применяются трубы классов ПЭ80 (MRS 8,0 МПа) и ПЭ100 (MRS 10,0 МПа). Классификация ПЭ основана на минимальной требуемой прочности (MRS – минимальная длительная прочность, МПа), определяемой по результатам длительных гидростатических испытаний при 20 °С в течение 50 лет. Соотношение стандартного отношения размеров (SDR) характеризует толщину стенки трубы и определяет номинальное напряжение при заданном внутреннем давлении. Для газопроводов применяются трубы SDR 11, SDR 17,6 и SDR 21, обеспечивающие расчетное давление до 0,6 МПа.

Критическим механизмом разрушения полиэтиленовых труб является медленный рост трещин (SCG – Slow Crack Growth), протекающий латентно под действием постоянных растягивающих напряжений. Процесс SCG инициируется в зонах концентрации напряжений (сварные соединения, царапины, вкрапления) и развивается со скоростью, экспоненциально зависящей от уровня напряжения и температуры. Для ПЭ80 характерна скорость роста трещин 0,1–0,5 мм/час при напряжении 4 МПа и 80 °С, для ПЭ100 – в 2–3 раза ниже благодаря повышенной молекулярной ориентации полимерных цепей.

Система технической диагностики полиэтиленовых газопроводов включает четыре основных метода. Визуальный контроль позволяет выявить наружные дефекты (трещины, деформации, коррозионные повреждения фитингов) с точностью до 0,1 мм

при использовании оптических приборов. Ультразвуковой контроль (УЗК) сварных соединений выполняется дефектоскопами типа А1212 «МАСТЕР», УД «ПЕЛЕНГ» с частотой зондирующего сигнала 2–5 МГц и точностью определения координат дефекта до ±0,1 мм. Метод позволяет обнаружить поры, включения, недопрокалы в сварных швах на глубине до 50 мм.

Внутритрубная диагностика Smart Pigging обеспечивает непрерывный мониторинг состояния трубы на километры протяженности. Интеллектуальные скребки оснащаются ультразвуковыми или магнитными датчиками, регистрирующими толщину стенки, геометрические отклонения и дефекты с точностью ±5 % от номинальной толщины. Однако в распределительных сетях Беларуси применение Smart Pigging ограничено из-за отсутствия пусковых камер, малых диаметров (до 160 мм) и сложной геометрии сетей с большим количеством отводов.

Георадарный контроль (GPR) используется для оценки условий залегания трубопроводов без вскрытия грунта. Метод основан на излучении электромагнитных импульсов частотой 100–1000 МГц и регистрации отраженных сигналов от границ раздела сред. GPR позволяет выявить пустоты в грунте, зоны увлажнения, механические повреждения изоляции и нарушения геометрии трассы с глубиной зондирования до 3 м и разрешением 5–10 см.

Прогнозирование остаточного ресурса базируется на лабораторных испытаниях образцов-вырезок согласно СТБ ГОСТ Р 50838 и ГОСТ 18599. Испытания включают кратковременные разрывные тесты при температурах 20, 40 и 80 °С для определения предела прочности и длительные гидростатические испытания при напряжении MRS на 100 и 1000 ч. Результаты аппроксимируются уравнением длительной прочности, связывающим напряжение разрушения с временем и температурой:

$$\log(\sigma) = A - B \cdot \log(t) + CT,$$

где σ – напряжение разрушения, МПа; t – время до разрушения, ч; T – температура, °С; A, B, C – эмпирические коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов для каждой партии материала. Для ПЭ80 типичные значения: $A = 5{,}2–5{,}8$; $B = 0{,}15–0{,}25$; $C = 0{,}008–0{,}012$. Для ПЭ100: $A = 5{,}8–6{,}4$; $B = 0{,}12–0{,}20$; $C = 0{,}006–0{,}010$.

Сравнительный анализ нормативных подходов выявляет существенные различия между системами СНГ и Европейского Союза. В Беларуси доминирует регламентный подход (СН 4.03.01-2019), предусматривающий первую оценку технического состояния газопроводов через 40 лет эксплуатации с последующими периодическими проверками каждые 10 лет. Данный подход основан исключительно на календарном сроке службы и не учитывает фактическое состояние материала, условия эксплуатации и накопленные повреждения.

В Европе применяется риск-ориентированный подход (EN 1555, ISO 4437), основанный на непрерывном мониторинге состояния газопроводов с использованием цифровых двойников и IoT-мониторинга. Система включает установку датчиков давления, температуры, деформации и акустической эмиссии с передачей данных в реальном времени. Методика PB-10 (Performance-Based) позволяет прогнозировать остаточный ресурс с точностью ±5 лет и планировать ремонтные работы по фактической необходимости, что снижает эксплуатационные затраты на 25–40 % по сравнению с регламентным подходом.

Обеспечение безаварийной эксплуатации полиэтиленовых газопроводов требует комплексного подхода, сочетающего соблюдение нормативов с внедрением современных методов диагностики. Полученное уравнение прогнозирования длитель-

ной прочности позволяет оценивать остаточный ресурс с учетом температурно-временных факторов. Переход от регламентного к риск-ориентированному подходу с использованием цифровых паспортов и IoT-мониторинга позволит оптимизировать затраты и повысить надежность газоснабжения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на адаптацию европейских методик к условиям эксплуатации в Республике Беларусь.

Литература

1. Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления : СН 4.03.01-2019. – М. : НТЦ ПБ, 2019.
2. Трубы полиэтиленовые для газопроводов : ГОСТ 18599-2001. – М. : Стандартинформ, 2001.
3. Трубы и фитинги из полиэтилена для газопроводов : СТБ ГОСТ Р 50838-2019. – Минск : Госстандарт, 2019.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ТЭЦ

Б. В. Чернейко, А. В. Кононович

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

Научный руководитель Н. А. Вальченко

Проведен расчет гидравлических потерь в системе оборотного водоснабжения ТЭЦ-2. Установлено, что максимальная скорость потока достигает 4,42 м/с на участках с диаметром 1000 мм, число Рейнольдса превышает значение 10^6 (режим развитой турбулентности). Суммарные путевые потери составили 9,74 м, местные – 11,36 м, что соответствует нормативному диапазону 5–15 м. Выявлен потенциал снижения энергопотребления циркуляционных насосов на 20–40 % путем увеличения диаметров напряженных участков.

Ключевые слова: оборотное водоснабжение, гидравлические потери, гидравлический расчет, энергоэффективность.

Система оборотного водоснабжения (СОВ) является критически важным элементом ТЭЦ, обеспечивающим охлаждение конденсаторов турбогенераторов. Гидравлические потери напора непосредственно влияют на энергопотребление циркуляционных насосов, которое составляет 0,25–0,35 % от мощности турбогенератора. Оптимизация гидравлических характеристик позволяет снизить эксплуатационные затраты на 20–40 % [1].

Объект исследования – СОВ ТЭЦ-2 с пятью циркуляционными насосами (производительность до 12500 т/ч, напор 0,1–0,2 МПа), тремя конденсаторами турбогенераторов (гидравлическое сопротивление 48,1 кПа) и двумя градирнями. Общая протяженность напорных и сливных трубопроводов составляет 552 и 351 м при диаметрах 1000–2200 мм. Расчетный расход воды при работе трех насосов и двух турбогенераторов – 25000 т/ч.

Гидравлический расчет выполнен по методике [2] с использованием зависимостей для определения потерь на трение по длине трубопроводов и коэффициентов местных сопротивлений. Расчет проведен при следующих физических свойствах воды: плотность 999 кг/м³, кинематическая вязкость $1{,}56 \cdot 10^{-6}$ м^2/с, шероховатость труб 0,15 мм, ускорение свободного падения 9,81 м/с^2.

Коэффициенты гидравлического сопротивления варьируются от 0,056 до 0,068. Максимальная скорость потока 4,42 м/с зафиксирована на участке 3а-4а с диаметром 1000 мм. Наибольшие потери напора наблюдаются на участках с небольшими диаметрами: 1,68 м на участке 36-35 (диаметр 1600 мм, $Re = 5{,}26 \cdot 10^6$), 0,81 м на участке 4а-5а и 0,72 м на участке 9-64 с диаметром 1600 мм. Участки с диаметрами 2200 мм характеризуются минимальными потерями (0,18–0,42 м) при скоростях 1,6–2,4 м/с.

Суммарные путевые потери составляют 9,74 м, в том числе по напорному циркводоводу № 2 – 8,77 м, циркводоводу № 1 – 0,97 м. Местные сопротивления дают потери 11,36 м, включая вход и выход в конденсаторы (8,44 м), сужения и расширения (2,84 м), повороты труб (0,08 м).

Расчетные потери в трубопроводах находятся в пределах нормативного диапазона 5–15 м для систем оборотного водоснабжения ТЭЦ [3]. Сопротивление конденсаторов турбин (4,9 м, или 48,1 кПа) соответствует проектным значениям. Развитая турбулентность обеспечивает эффективный теплообмен в конденсаторах, но приводит к повышенным гидравлическим потерям.

Таким образом, система функционирует в штатном режиме, гидравлические параметры соответствуют проектным значениям. Наиболее напряженными являются участки с диаметрами 1000–1200 мм, где скорости достигают 3–4,4 м/с.

В работе выполнен анализ гидродинамических режимов системы оборотного водоснабжения Гомельской ТЭЦ-2 на основе эксплуатационных данных, что позволило оперативно оценить характер течения и потери напора.

Установлено, что движение охлаждающей воды на всех участках трубопроводов происходит при развитой турбулентности (Re составляют $1{,}15 \cdot 10^5$–$5{,}26 \cdot 10^5$). Такой режим обеспечивает высокую интенсивность теплообмена в конденсаторах, но сопровождается значительными гидравлическими потерями, квадратично зависящими от скорости потока.

Установлен существенный разброс скоростей течения: от 1,28 до 4,42 м/с. На участке 3а-4а зафиксировано превышение рекомендуемого диапазона (1,5–3,5 м/с), что создает риски эрозионного износа и кавитации. Подтверждена квадратичная зависимость потерь от скорости: увеличение расхода в 2,2 раза (с 3,47 до 7,64 $м^3$/с) привело к десятикратному росту путевых потерь на участке 36–35 (с 0,166 до 1,679 м). Отмечено, что конденсатор является доминирующим источником местного сопротивления ($\xi = 84{,}42$, потери 7,04 м, что составляет 78,9 % от суммарных местных потерь). Обнаружена диспропорция потерь между параллельными ветвями (8,77 м против 0,97 м), требующая гидравлической балансировки системы.

Полученные результаты можно использовать для снижения энергопотребления циркуляционных насосов (внедрение частотно-регулируемых приводов, оптимизация числа работающих агрегатов), планирования модернизации СОВ (замена зауженного участка 3а-4а, очистка теплообменника 5в), гидравлической балансировки системы и разработки эксплуатационных регламентов.

Литература

1. Соколов, Е. Я. Промышленная теплоэнергетика / Е. Я. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 2012. – 312 с.
2. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
3. Справочник по проектированию систем водоснабжения и канализации / под ред. А. А. Добромыслова. – М. : Стройиздат, 2010. – 256 с.

МОДУЛЬНАЯ CO_2 – ТЕПЛОНАСОСНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОГО ТЕПЛА ЦОД РУП «БЕЛТЕЛЕКОМ»

П. С. Колмачева

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

Научный руководитель Т. Н. Никулина

Разработана модульная установка на базе транскритического CO_2 теплового насоса для рекуперации низкопотенциального сбросного тепла серверов ЦОД РУП «Белтелеком». Система использует парокомпрессионный цикл с CO_2, обеспечивая подъем температуры тепла до уровня, пригодного для отопления или технологических нужд (до 80–150 °C). Модульность позволяет масштабировать мощность от 100 кВт до 10 МВт, интегрируясь в существующую инфраструктуру без значительных перестроек. Главное преимущество технологии – способность транскритического цикла производить горячую воду температурой выше 85 °C, что идеально соответствует требованиям зимнего отопления и промышленных процессов.

Ключевые слова: CO_2 тепловой насос, модульная установка, утилизация сбросного тепла, ЦОД Белтелеком, транскритический цикл, энергоэффективность.

Анализ сбросного тепла ЦОД и требований теплосетей Беларуси. Крупные ЦОД в Беларуси, такие как объекты «Белтелеком» и коммерческие дата-центры, сосредоточены преимущественно в Минске и региональных центрах. Они выделяют значительное количество низкопотенциального тепла (35–45 °C) круглогодично и стабильно. Однако прямое использование этого тепла невозможно из-за высоких требований городских теплосетей. В отопительный сезон сети требуют температуру подачи 95–105 °C, а летом для ГВС – 55–60 °C. Для преодоления этого температурного разрыва необходима технология, способная значительно повысить потенциал сбросного тепла. Транскритическая CO_2-ТНУ является оптимальным решением, так как позволяет нагревать теплоноситель до 90 °C и выше. Это в свою очередь, приводит к интеграции утилизированной энергии в городскую систему через ЦТП. Такая интеграция превращает статью расходов ЦОД на охлаждение в источник дохода. Одновременно решается задача энергосбережения и снижения нагрузки на традиционную генерацию тепловой энергии с помощью котельных. Таким образом, утилизация тепла ЦОД представляет собой стратегическую возможность для повышения энергоэффективности городской инфраструктуры Беларуси.

Термодинамическое моделирование транскритического цикла CO_2-ТНУ 800 кВт для г. Минска. Для определения оптимальных рабочих параметров CO_2-ТНУ мощностью 800 кВт было проведено термодинамическое моделирование транскритического цикла с учетом климатических условий г. Минска. В табл. 1 представлены расчетные показатели системы для различных сезонных условий, включая ключевые термодинамические параметры и энергетическую эффективность.

Таблица 1

Термодинамические параметры цикла CO_2-ТНУ

Параметр	Формула расчета	Лето (+25 °С)	Зима (–15 °С)	Среднегодовое
Тепловая мощность, кВт	$Q = G(h_2 - h_1)$	800	800	800
Температура испарения, °С	$T_{исп} = f(P_{исп})$	+10	–20	–5
Давление нагнетания, МПа	$P_{нагн.опт} = f(T_{нар.возд})$	8,2	10,1	9,2
Температура газа после компрессора, °С	$T_2 = f(P_{нагн}, S_1)$	95	125	110
Температура воды на выходе, °С	$T_{воды\ вых} = T_2 - \Delta T$	85	75	80
COP системы	$COP = Q_{газ}/W_{комп}$	4,8	3,2	4,0
Электрическая мощность компрессора, кВт	$W_{комп} = m\dot{}(h_2 - h_1)$	167	250	200
Температурный напор в газоохладителе, °С	$\Delta T = T_{газа.вх} - T_{воды\ вых}$	6	8	7
Массовый расход CO_2, кг/с	$G = Q/(h_2 - h_3)$	3,2	2,8	3,0
Работа компрессора, кДж/кг	$W = h_2 - h_1$	52,2	89,3	66,7

Примечание. G – массовый расход хладагента; h_1, h_2, h_3 – энтальпии в характерных точках цикла, S_1 – энтропия на входе в компрессор; ΔT – температурный напор; $Q_{газ}$ – тепловая мощность газоохладителя; W – мощность компрессора.

Моделирование подтвердило высокую эффективность CO_2-теплонасоса в климатических условиях Беларуси с достижением среднегодового COP = 4,0. Наилучшие показатели наблюдаются в летний период (COP = 4,8), тогда как зимой требуется повышенное давление нагнетания до 10,1 МПа для стабильной работы. Оптимальный рабочий диапазон давления составляет 9,0–9,5 МПа при температурном напоре 6–7 °С в газоохладителе.

Технико-экономическая оценка внедрения. Для количественной оценки эффективности проекта рассчитаны ключевые технико-экономические показатели внедрения CO_2-теплонасосной установки. Результаты расчета, выполненные на основе актуальных тарифов на энергоносители на 2025 г., представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технико-экономические показатели проекта

Показатель	Значение	Единица измерения	Расчетная формула
Исходные данные			
Тепловая мощность для утилизации	800	кВт	–
Коэффициент эффективности (COP)	4,0	–	–
Стоимость электроэнергии	0,3074	руб./кВт · ч	–

Окончание табл. 2

Показатель	Значение	Единица измерения	Расчетная формула
Стоимость тепловой энергии от газа	0,2125	руб./кВт · ч	–
Годовой режим работы	8 400	часов/год	–
Расчетные показатели			
Годовая выработка тепла	6 720 000	кВт · ч/год	800 кВт · 8 400 ч
Потребляемая мощность ТНУ	177	кВт	800 кВт/4,0 COP
Годовое потребление электро-энергии	1 486 800	кВт · ч/год	177 кВт · 8 400 ч
Годовые затраты на электро-энергию	457 042	руб./год	1 486 800 · 0,3074
Стоимость замещаемой тепловой энергии	1 428 000	руб./год	6 720 000 · 0,2125
Чистая годовая экономия	**970 958**	**руб./год**	**1 428 000–457 042**
Капитальные затраты			
Оборудование CO_2-ТНУ	1 000 000–1 500 000	руб.	Зависит от комплектации
Монтаж и пусконаладка	200 000–300 000	руб.	–
Общие капиталовложения	**1 200 000–1 800 000**	**руб.**	–
Инвестиционные показатели			
Срок окупаемости (min)	1,24	лет	1 200 000/970 958
Срок окупаемости (max)	1,85	лет	1 800 000/970 958

При капитальных вложениях проект утилизации тепла ЦОД с использованием CO_2-теплонасосной установки окупается примерно за 2 года за счет продажи тепла в городскую сеть.

Сравнительный анализ эффективности CO2-ТНУ и традиционных систем теплоснабжения. По энергетической эффективности CO_2-ТНУ превосходит традиционные теплонасосы на 15–25 %, обеспечивая среднегодовой COP 4,0–4,5 против 3,2–3,8 у R134a, при этом способность нагрева теплоносителя до 120 °C против максимальных 65°C у традиционных ТНУ открывает возможности для прямой интеграции в системы централизованного теплоснабжения [1].

Если CO_2-ТНУ преобразует 1 кВт · ч электроэнергии в 4–4,5 кВт тепла, то газовые котельные имеют КПД 0,85–0,92, теряя значительную часть энергии с дымовыми газами. Это определяет принципиальную разницу в эксплуатационных расходах: стоимость произведенного тепла CO_2-ТНУ составляет примерно 0,05–0,06 руб./кВт · ч против 0,21–0,25 руб./кВт · ч у газовых котельных при текущих тарифах.

Экономический анализ показывает более короткий срок окупаемости CO_2-систем (1,1–1,6 года) по сравнению с традиционными ТНУ (2,5–3,5 года), несмотря на более высокие первоначальные инвестиции, что обусловлено значительным снижением эксплуатационных затрат и возможностью утилизации бросового тепла.

Для условий Беларуси с характерными значительными сезонными колебаниями температур CO2-ТНУ демонстрирует стабильно высокую эффективность как в зимний, так и в летний периоды, обеспечивая надежное теплоснабжение при минимальном воздействии на окружающую среду.

Проведенное исследование подтвердило высокую технико-экономическую эффективность внедрения модульных CO_2-ТНУ для утилизации сбросного тепла от ЦОД в условиях Беларуси.

Расчеты показывают, что для ЦОД мощностью 1 МВт срок окупаемости проекта составляет 1,06–1,59 года при годовой экономии около 1,46 млн руб. Ключевыми преимуществами решения являются экологическая безопасность CO_2 как хладагента, устойчивость работы в климатических условиях Беларуси и модульный принцип построения установки, обеспечивающий гибкость масштабирования. Реализация проекта позволит не только снизить операционные затраты ЦОД, но и внести вклад в энергосбережение и декарбонизацию городской инфраструктуры.

Литература

1. Bruno, F. CO_2 Refrigeration and Heat Pump Systems – A Comprehensive Review / F. Bruno, M. Belusko, E. Halawa // Energies. – 2019. – N 12 (15). – P. 2959.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ R404A, R410A И R407C НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

П. С. Колмачева

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при конденсации паров озонобезопасных хладагентов R404A, R410A и R407C на горизонтальных продольно-оребренных трубах с трапециевидными ребрами. В диапазоне плотностей теплового потока относительно всей оребренной поверхности 3500–93000 Вт/м^2 и давлений насыщения 0,95–1,5 МПа. Установлено повышение интенсивности теплоотдачи в 2–2,5 раза по сравнению с гладкими поверхностями; коэффициенты теплоотдачи достигают 4300 Вт/(м^2 · К), толщина конденсационной пленки 1,6–7,9 · 10^{-5} м. Хладагент R410A показал наилучшие значения коэффициентов теплоотдачи. Получены опытные данные, согласующиеся с теорией Нуссельта (отклонение < 17 %). Разработаны рекомендации для проектирования энергоэффективных оребренных конденсаторов для рассмотренных хладагентов.

Ключевые слова: конденсация хладагентов, теплообмен, оребренные поверхности, интенсификация теплоотдачи, пленка конденсата.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования при конденсации пара и гравитационном ламинарном течении пленки конденсата на вертикальной поверхности.

Экспериментальное исследование проводилось на продольно оребренной трубе с ребром трапециевидного профиля, представленного на рис. 1.

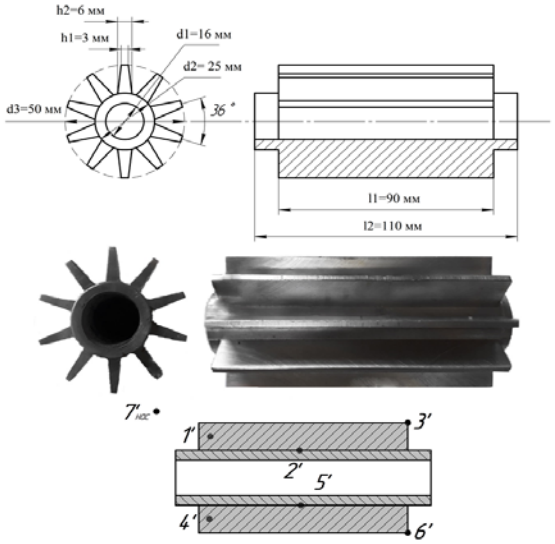


Рис. 1. Экспериментальный образец с расположением термопар

Измерительная система для камеры конденсации представляет собой комплекс, состоящий из аналого-цифрового преобразователя. Управление процессом измерений производится специально созданной для этих целей программой, далее измеренное значение температур в виде термо-ЭДС поступает на компьютер, где программой обработки данных производится перевод значений термо-ЭДС в градусы.

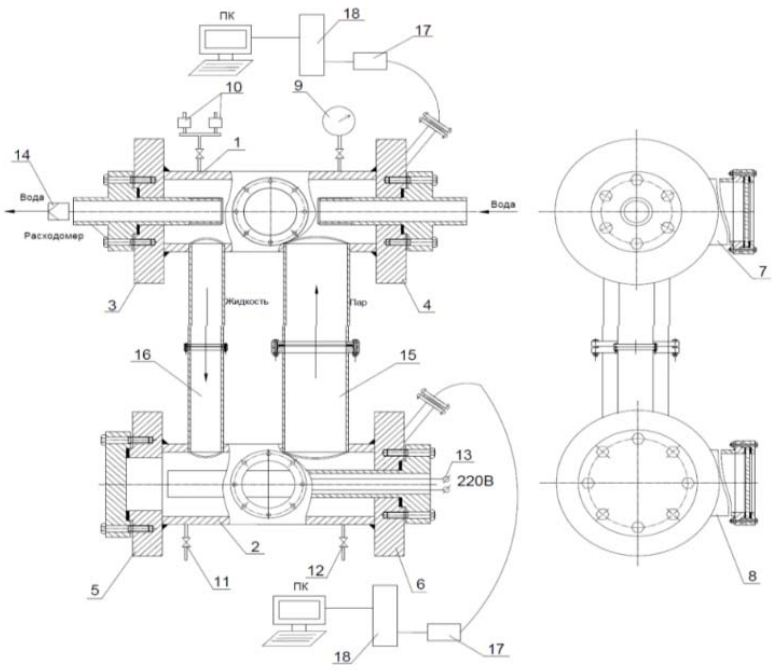


Рис. 2. Экспериментальный стенд [1]:
1, *2* – рабочие камеры; *3*–*6* – фланцы; *7*, *8* – смотровые иллюминаторы;
9 – манометр; *10* – предохранительный клапан; *11*, *12* – вентиль;
13 – нагреватель; *14* – расходомер; *15* – паровой канал; *16* – жидкостной канал;
17 – аналаго-цифровой преобразователь; *18* – компьютер

Рассматривалась пленочная конденсация медленно движущегося сухого насыщенного пара на горизонтальной оребренной трубе, имеющей уклон относительно горизонтальной оси 5°. Такой уклон, обеспечивает хорошее стекание образующейся пленки конденсата и освобождение поверхности теплообмена, тем самым уменьшая термическое сопротивление пленки конденсата.

Для проверки полученных в эксперименте значений были проведены расчеты, основанные на экспериментальных данных и формуле Нуссельта. В таблице указаны коэффициент теплоотдачи «α» и толщина пленки «δ».

Результаты экспериментальных и расчетных данных

R404A	**По Нуссельту**		**Эксперимент**	
***Q*, Вт**	**α, Вт/м² · К**	**δ, м**	**α, Вт/м² · 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	$2{,}709 \cdot 10^{-5}$
R410A				
30	4757	$2{,}27 \cdot 10^{-5}$	835	$12{,}9 \cdot 10^{-5}$
120	4183	$2{,}51 \cdot 10^{-5}$	1947	$5{,}54 \cdot 10^{-5}$
285	3818	$2{,}75 \cdot 10^{-5}$	4079	$2{,}57 \cdot 10^{-5}$
800	2812	$3{,}21 \cdot 10^{-5}$	3072	$2{,}92 \cdot 10^{-5}$
R407C				
30	4890	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$	1920	$4{,}8 \cdot 10^{-5}$
120	3922	$2{,}4 \cdot 10^{-5}$	3602	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$
285	3370	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$	4605	$2{,}0 \cdot 10^{-5}$
800	2980	$3{,}0 \cdot 10^{-5}$	4310	$2{,}1 \cdot 10^{-5}$

Толщиной пленки конденсата определялась, вычисленная по формуле Нуссельта и по методике, описанной в [2]:

$$\delta_{\text{пл}} = \sqrt[4]{\frac{4\lambda_{\text{ж}}\mu_{\text{ж}}(t_{\text{н}} - t_{\text{с}})x}{2\rho_{\text{ж}}^2 q}}. \qquad (1)$$

На рис. 3, *а–г* показаны следующие зависимости: коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока; толщины пленки от плотности теплового потока; толщины пленки от температурного напора; коэффициента теплоотдачи от температурного напора.

Сравнительный анализ показывает, что на оребренной поверхности максимальные значения коэффициентов теплоотдачи достигаются при конденсации R410A, затем следует R404A, а R407C в целом демонстрирует наименьшую интенсивность теплообмена при одинаковых условиях.

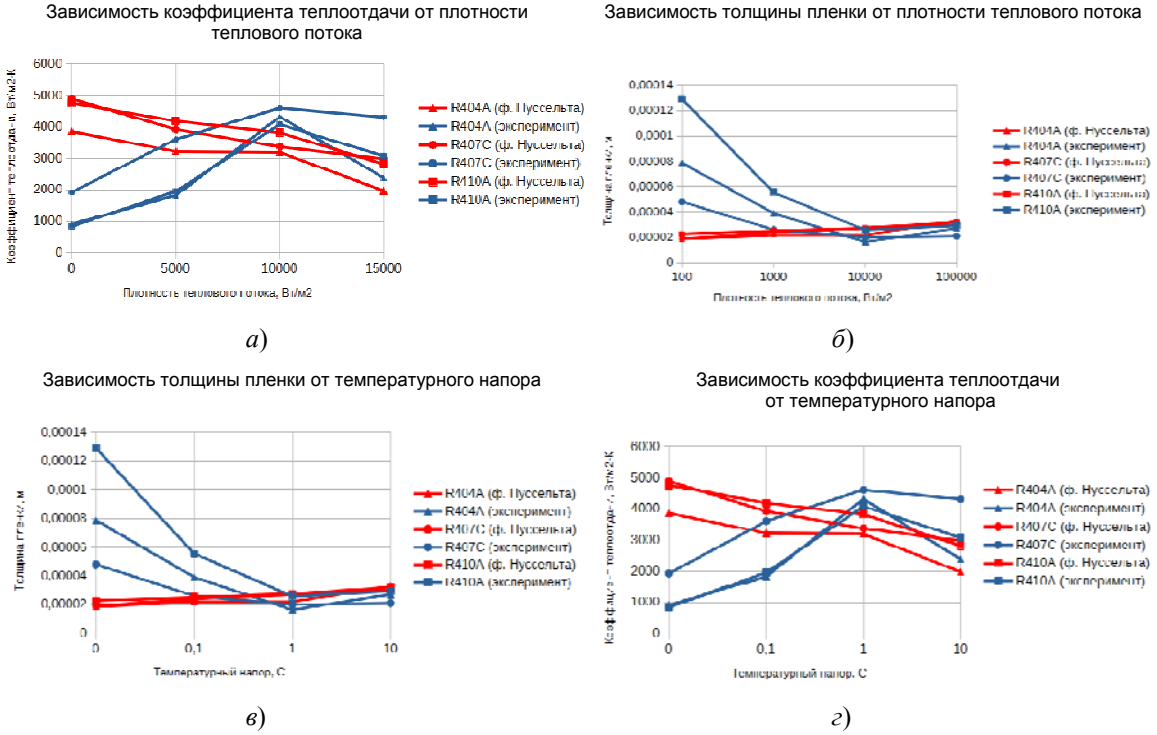


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных фреонов и данных по Нуссельту

Полученные зависимости коэффициентов теплоотдачи хорошо согласуются при значениях плотности теплового потока q = 7000–15000 Вт/м^2 с коэффициентами теплоотдачи полученными, по формуле Нуссельта (неопределенность составляет < 17 %).

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. – С. 50–57.
2. Овсянник, А. В. Теплообмен при конденсации чистого озонобезопасного хладагента R404A на продольно-оребренных горизонтальных трубах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4. – С. 58–69.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ОЗОНОБЕЗОПАСНОГО ХЛАДАГЕНТА R410A НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д. Г. Шутов

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Представлены результаты анализа исследования процессов пленочной конденсации хладагента R410A на горизонтальной продольно-оребренной трубке с уклоном. Рассмотрены теплофизические свойства хладагента, а также влияние тепловой нагрузки и темпера-

турного напора на коэффициенты теплоотдачи и толщину пленки. На основе данных построены графические зависимости, позволяющие оценить гидродинамику и интенсивность теплообмена на оребренной поверхности.

Ключевые слова: хладагент R410A, пленочная конденсация, продольно-оребренная поверхность, коэффициент теплоотдачи, тепловой поток, температурный напор, толщина конденсатной пленки.

Озонобезопасный смесевой хладагент R410A представляет собой двойную азеотропную смесь фреонов R32 и R125 в соотношении 50/50 и применяется для заправки новых систем кондиционирования воздуха высокого давления, в сплит-системах и тепловых насосах для охлаждения и отопления. Применяемые масла – полиэфирные. Температура кипения R410A при нормальных условиях составляет –51,5 °С, что предполагает его использование и в низкотемпературных системах охлаждения.

Таблица 1

Теплофизические характеристики R410A

Температура кипения при нормальных условиях	**Теплота парообразования, кДж/кг**	**Критическая температура $t_{кр}$, °С**	**Критическое давление $P_{кр}$, МПа**	**Плотность ρ, кг/м³**	**Коэффициент теплопроводности λ, Вт/мК**	**Удельная теплоемкость C_p, кДж/кг**	**Давление насыщения $P \cdot 10(-5)$**
–51,5	270,3	72,13	4,93	1340	0,108 (при 15 °С) 0,087 (при 25 °С)	1,692	1,1 (при –50 °С) 16,4 (при 25 °С)

Рассматривалась пленочная конденсация медленно движущегося сухого насыщенного пара в конденсационной камере на горизонтальной оребренной трубке, имеющей уклон 5° относительно горизонтальной оси. Это обеспечивало интенсивное гравитационное течение пленки конденсата в сторону уклона из-за малой вязкости 410A и освобождение поверхности теплообмена от конденсата.

Конденсация паров 410A осуществлялась на горозонтальной трубке с ребром трапецевидного профиля высотой 25 мм (рис. 1).

Наружная поверхность продольно оребренной трубки, на которой происходит конденсация паров R410A, представляет собой сумму поверхностей ребер и межреберной поверхности, причем ребра разнонаправленно ориентированы в пространстве. Исследуемый образец установлен с наклоном к горизонтальной оси. Для определения гидродинамических характеристик движущейся пленки по поверхности оребренной трубки необходимо ввести понятие некой средней скорости движения пленки эквивалентной скорости движения ее по вертикальной поверхности, представляющей собой развертку оребренной поверхности. Эта средняя скорость может быть определена по расходу конденсата и площади поперечного сечения пленки конденсата.

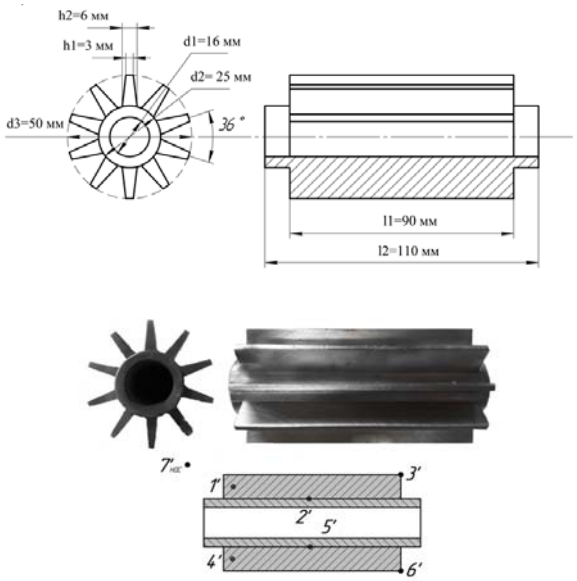


Рис. 1. Экспериментальный образец с расположением термопар

Таким образом, знание гидродинамических характеристик гравитационно стекающей пленки конденсата с поверхности теплообмена позволит определить значение интенсивности теплоотдачи ребра и всей оребренной поверхности.

Теоретические исследования. Плотности тепловых потоков, коэффициенты теплоотдачи и температурные напоры «температура насыщения – температура поверхности» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Q, Вт	$q_р$, Вт/м^2	$\alpha_р$, Вт/м$^2 \cdot$ К	$\Delta t_р$, °С	$q_{мр}$, Вт/м^2	$\alpha_{мр}$, Вт/м$^2 \cdot$ К	$\Delta t_{мр}$, °С	q_0, Вт/м^2	α_0, Вт/м$^2 \cdot$ К	Δt_0, °С
30	728	91	0,8	3474	2316	1.5	960	835	1,15
120	2913	1713	1,7	13897	6948	2,0	3602	1947	1,85
285	6918	4612	1,5	33005	13202	2,5	8059	4079	2,0
500	2138	3793	3.2	57904	10528	5,5	3361	3072	4,35

Толщина гравитационно стекающей пленки конденсата по ребру и общая оребренной поверхности определялась по экспериментальным данным коэффициентов теплоотдачи ребра и общего. Результаты представлены в табл. 3

Таблица 3

Q, Вт	По формуле Нуссельта					
	$\alpha_р$, Вт/м$^2 \cdot$ К	$\alpha_{мр}$, Вт/м$^2 \cdot$ К	α_0, Вт/м$^2 \cdot$ К	$\delta_р$, м	$\delta_{мр}$, м	δ_0, м
30	5192	2511	4757	$2{,}08 \cdot 10^{-5}$	$4{,}4 \cdot 10^{-5}$	$2{,}27 \cdot 10^{-5}$
120	4200	4085	4183	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$	$2{,}57 \cdot 10^{-5}$	$2{,}51 \cdot 10^{-5}$
285	4375	3846	3818	$2{,}4 \cdot 10^{-5}$	$2{,}73 \cdot 10^{-5}$	$2{,}75 \cdot 10^{-5}$
500	3170	2812	2812	$2{,}84 \cdot 10^{-5}$	$3{,}2 \cdot 10^{-5}$	$3{,}21 \cdot 10^{-5}$

Продолжение табл. 3

Q, Вт	Экспериментальный					
	$\alpha_р^э$, Вт/м^2 · К	$\alpha_{мр}^э$, Вт/м^2 · К	$\alpha_0^э$, Вт/м^2 · К	$\delta_р^э$, м	$\delta_{мр}^э$, м	$\delta_0^э$, м
30	910	2316	835	$11{,}8 \cdot 10^{-5}$	$4{,}7 \cdot 10^{-5}$	$12{,}9 \cdot 10^{-5}$
120	1713	6948	1947	$6{,}3 \cdot 10^{-5}$	$1{,}55 \cdot 10^{-5}$	$5{,}54 \cdot 10^{-5}$
285	4612	13202	4079	$2{,}57 \cdot 10^{-5}$	$0{,}8 \cdot 10^{-5}$	$2{,}57 \cdot 10^{-5}$
500	3793	10528	3072	$2{,}37 \cdot 10^{-5}$	$0{,}85 \cdot 10^{-5}$	$2{,}92 \cdot 10^{-5}$

Данные в виде графических зависимостей представлены на (рис. 2–7), которые позволяют проводить анализ полученных результатов и протекающих процессов гидродинамики и теплообмена при конденсации паров 410А на вертикальной поверхности при гравитационном течении пленки конденсата.

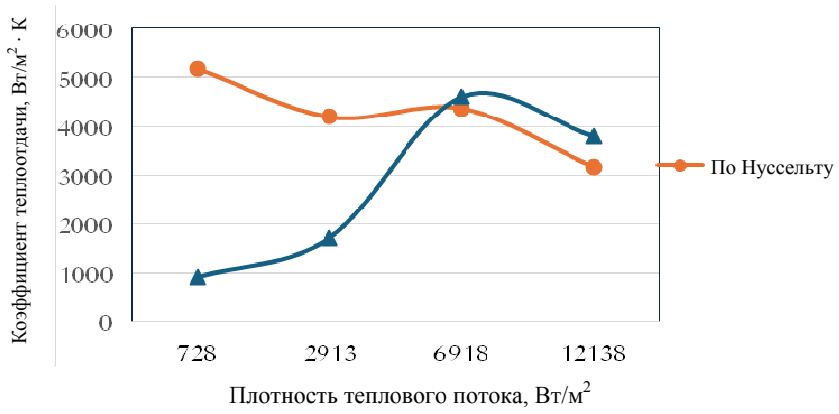


Рис. 2. Влияние плотности теплового потока на ребре на коэффициент теплоотдачи ребра

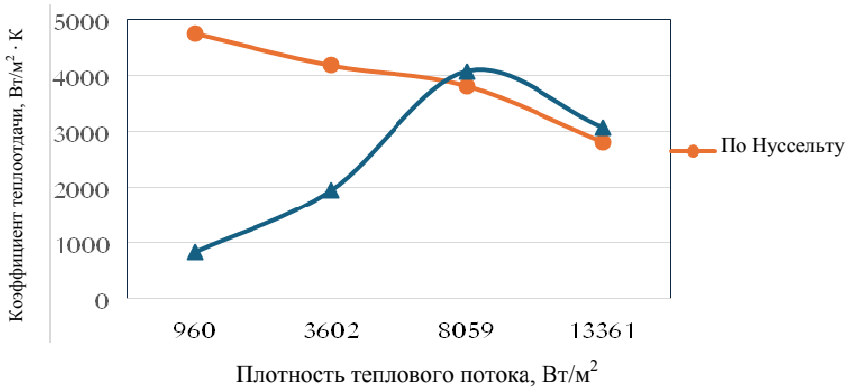


Рис. 3. Влияние плотности теплового потока оребренной поверхности на коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности

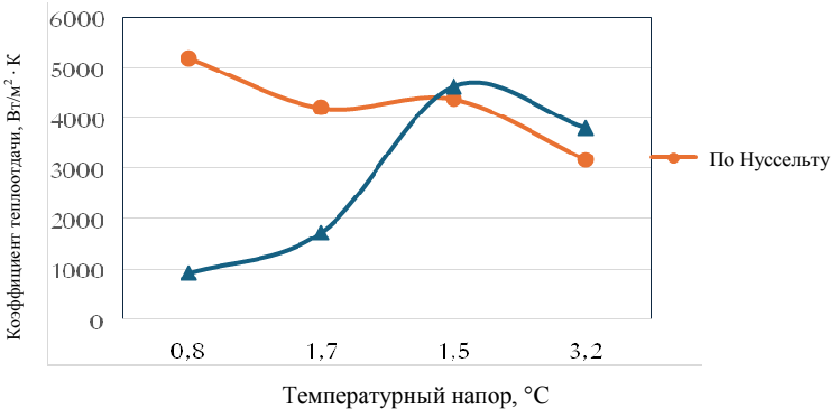


Рис. 4. Влияние температурного напора по ребру на коэффициент теплоотдачи ребра

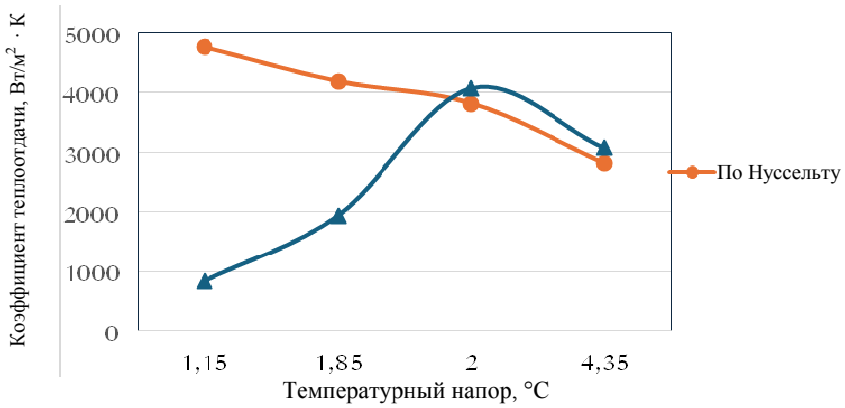


Рис. 5. Влияние температурного напора оребренной поверхности на коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности

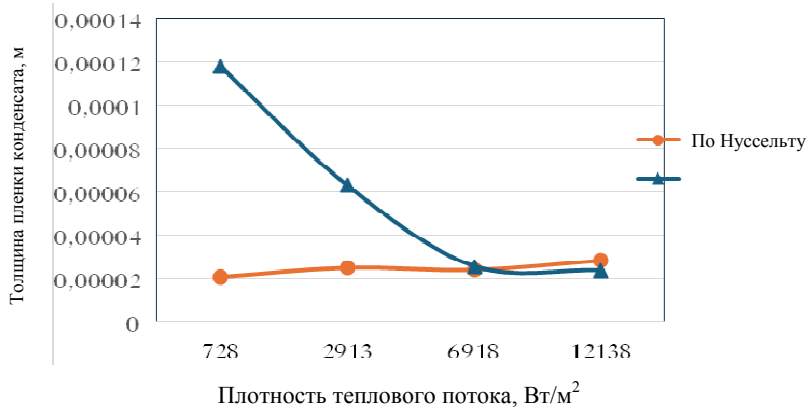


Рис. 6. Влияние плотности теплового потока по ребру на толщину пленки конденсата на ребре

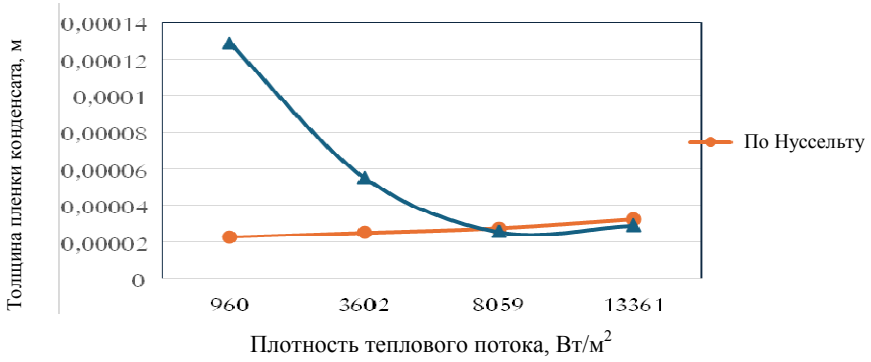


Рис. 7. Влияние плотности теплового потока по оребренной поверхности на толщину пленки конденсата на оребренной поверхности

Исследования показали, что при конденсации R410C на продольно-оребренной поверхности существует оптимальный режим работы ($q \approx 6918$ Вт/м^2, $\Delta t \approx 2{,}0$ °C), при котором достигаются максимальные коэффициенты теплоотдачи $\alpha p = 4612$ Вт/м$^2 \cdot$К, $\alpha o = 44079$ Вт/м$^2 \cdot$К) и минимальная толщина пленки конденсата. Дальнейшее увеличение тепловой нагрузки приводит к утолщению пленки и снижению интенсивности теплообмена. Установлено, что температурный глайд R410C увеличивается с ростом нагрузки от 1,15 до 4,35 °C и оказывает значительное влияние на эффективность конденсации: максимальная теплоотдача достигается при глайде 2,0 °C, а его дальнейший рост снижает эффективность.

Проведенные исследования показали, что характер изменения коэффициентов теплоотдачи и толщины конденсатной пленки R410A на продольно-оребренной поверхности определяется тепловой нагрузкой и температурным напором, что подтверждается полученными графическими зависимостями. Установлено наличие выраженного оптимума: при тепловом потоке порядка $q \approx 6900$ Вт/м^2 и температурном глайде около 2 °C достигаются максимальные значения коэффициентов теплоотдачи и минимальная толщина пленки. При дальнейшем росте тепловой нагрузки наблюдается утолщение пленки и снижение интенсивности теплообмена, что отражено на графиках зависимости α и δ от q и Δt. Таким образом, оптимизация режима конденсации на оребренных поверхностях позволяет существенно повысить эффективность теплообмена в системах, использующих хладагент R410A.

Литература

1. Овсянник, А. В. Экспериментальное исследование теплообмена при конденсации смесевых хладагентов и их маслофреоновых смесей на горизонтальных теплообменных поверхностях / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский, В. П. Никитенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 3. – С. 58–66.
2. Овсянник, А. В. Комплексный экспериментальный стенд для исследования процессов теплообмена при кипении и конденсации / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2016. –№ 4. – С. 79–83.
3. Овсянник, А. В. Гидродинамика и теплообмен при конденсации паров на вертикальной стенке с учетом конвекции ламинарно стекающей пленки / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1. – С. 93–98.
4. 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. – С. 50–57

5. Овсянник, А. В. Теплообмен при конденсации чистого озонобезопасного хладагента R404A на продольно-оребренных горизонтальных трубах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4. – С. 58–69.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК ДРАЙВЕРЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ, УСТОЙЧИВОСТИ И АДАПТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д. В. Короткевич

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

Научный руководитель Г. А. Рудченко

Рассмотрена роль искусственного интеллекта в трансформации современных энергосистем. Проанализированы ключевые направления применения искусственного интеллекта: прогнозирование спроса и генерации, оптимизация распределения электроэнергии и предиктивное обслуживание оборудования.

Ключевые слова: искусственный интеллект, энергосистема, оптимизация, прогнозирование.

Современные электроэнергетические системы сталкиваются с ростом энергопотребления, необходимостью интеграции возобновляемых источников энергии и старением инфраструктуры. Традиционные методы управления уже не справляются с возрастающей сложностью. Искусственный интеллект (ИИ) становится ключевым фактором трансформации энергетики, обеспечивая интеллектуальную координацию и оптимизацию процессов. Основные направления применения ИИ:

1. Прогнозирование спроса и генерации электроэнергии. Традиционные методы прогнозирования часто не справляются с колеблющимися моделями потребления, на которые влияют погодные условия, экономическая ситуация и поведение потребителей. Алгоритмы ИИ способны обрабатывать большие объемы исторических и текущих данных, включая метеорологические факторы, для создания высокоточных прогнозов потребления и выработки электроэнергии.

Точное прогнозирование позволяет более эффективно интегрировать возобновляемые источники энергии в общую энергосистему. ИИ-алгоритмы анализируют данные метеопрогнозов и текущего спроса, чтобы оптимизировать выработку нетрадиционных источников энергии, снижая зависимость от ископаемого топлива и повышая общую устойчивость системы.

2. Оптимизация распределения электроэнергии и динамическое балансирование потоков. В прошлом диспетчеры вручную перераспределяли мощность между регионами, что часто приводило к неравномерному использованию энергии, перегрузкам в пиковые часы и повышенному износу оборудования. Системы на базе ИИ способны в реальном времени перераспределять потребление на основе текущего спроса и состояния оборудования. Алгоритмы прогнозируют пиковые нагрузки и заранее корректируют параметры сети, предотвращая скачки напряжения и сбои. Это приводит к значительному сокращению потерь энергии, вызванных перенапряжением (до 10 %), снижению эксплуатационных расходов на сеть и уменьшению преждевременного выхода оборудования из строя.

3. Предиктивное обслуживание энергетического оборудования. Традиционно диагностика оборудования проводилась по плановому графику, что не исключало внезапных поломок между проверками и приводило к дорогостоящим аварийным ремонтам. ИИ-системы анализируют параметры оборудования круглосуточно, выявляя скрытые неисправности задолго до их проявления. Это позволяет проводить техническое обслуживание при первых признаках износа, продлевая срок службы генераторов, трансформаторов и линий электропередач, а также сокращая незапланированные простои и затраты на ремонт.

Искусственный интеллект – это не просто инструмент, а новая эпоха в развитии энергетической инфраструктуры. Однако успешное и широкомасштабное применение ИИ требует комплексного подхода: инвестиций в развитие технологий, создание надежных систем кибербезопасности, разработку образовательных программ и формирование адекватной нормативно-правовой базы.

Ожидаемые результаты от применения ИИ

Направление	Без ИИ	С ИИ
Прогнозирование спроса и генерации	Не справляются с колеблющимися моделями потребления	Высокоточные прогнозы, эффективная интеграция ВИЭ, снижение зависимости от ископаемого топлива
Оптимизация распределения электроэнергии	Неравномерное использование энергии, перегрузка в пиковые часы, износ оборудования	Перераспределение потребления, прогнозирование пиковых нагрузок, предотвращение скачков напряжения и сбоев
Предиктивное использование	Внезапные поломки, дорогостоящий аварийный ремонт	Постоянный анализ оборудования, выявление скрытых неисправностей, продление срока службы оборудования

Будущее энергетики неразрывно связано с дальнейшим развитием и интеграцией ИИ.

Литература

1. Аннагурбанов, Х. Применение искусственного интеллекта в управлении энергосистемами / Х. Аннагурбанов, С. А. Пионтковскаянный // Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-v-upravlenii-energosistemami/viewer (дата обращения: 02.04.2026).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ CO_2 В ОБЕСПЕЧЕНИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

К. С. Сыбатова

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

Научный руководитель Г. А. Рудченко

Технологии улавливания и хранения CO_2 приобретают особую актуальность в условиях глобального климатического кризиса и перехода энергетической отрасли к углеродной нейтральности. Они позволяют существенно снизить выбросы парниковых газов от иско-

паемого топлива, обеспечивая устойчивое развитие без полного отказа от традиционных источников энергии. Энергетика производит около 40 % антропогенных выбросов CO_2 и указанные технологии позволяют улавливать до 90 % из них на ТЭС и промышленных объектах, обеспечивая возможность ограничения потепления до целевых значений 1,5–2 °C.

Ключевые слова: углекислый газ, улавливание CO_2, хранение CO_2, транспортировка CO_2.

В эпоху глобальных климатических изменений энергетическая отрасль сталкивается с критической задачей – сохранить надежность энергоснабжения, минимизируя воздействие на окружающую среду. Технологии улавливания и хранения углекислого газа (англ. Carbon capture and storage, или CCS) позволяют захватывать до 90 % углекислого газа (CO_2), выделяемого при сжигании ископаемого топлива на тепловых электростанциях, и надолго изолировать его в геологических формациях, предотвращая выбросы в атмосферу.

Улавливание и хранение углерода – это процесс прямого улавливания и отделения CO_2 от промышленных и энергетических источников. Его основная цель заключается в создании концентрированного потока CO_2 высокого давления, его транспортировке по трубопроводам или судами к месту хранения, изолируя его от попадания в атмосферу, тем самым уменьшая дальнейшее негативное воздействие избыточных парниковых газов.

На данный момент существует три пути для улавливания и хранения углерода в точечных источниках, т. е. на электростанциях: улавливание перед сжиганием, улавливание после сжигания и сжигание с обогащенным кислородом топливом. В каждом процессе используются различные методы для снижения количества выбросов CO_2, образующихся при сжигании ископаемого топлива, но при этом каждый из них должен включать три основных этапа: улавливание, транспортировка и хранение углерода [1].

Наиболее распространенным является улавливание углерода после сжигания. Его суть заключается в отделении двуокиси углерода от других компонентов дымового газа, выходящего из котла. Это становится возможным благодаря следующим основным способам:

1. Улавливание на основе растворителя: CO_2 сначала абсорбируется раствором амина, а затем происходит нагрев абсорбирующей жидкости или сброс давления в ней, вследствие чего углекислый газ высвобождается из этой жидкости. Далее происходит его сжатие и охлаждение для последующей транспортировки и хранения.

2. Улавливание на основе твердого сорбента: включает физическую или химическую адсорбцию газа на твердом материале, после чего твердый сорбент отделяется от CO_2 путем уменьшения давления или повышения температуры.

3. Улавливание мембранами CO_2: дымовой газ сначала охлаждается и сжимается, затем подается через мембраны, которые физически отделяют CO_2 от других составляющих дымового газа.

В системах улавливания до сжигания топливо реагирует с потоком, насыщенным воздухом или кислородом, образуя синтез-газ, из которого CO_2 удаляется с помощью тех же методов, как и при улавливании после сжигания. Происходит разделение смеси на газовый поток CO_2 и поток водорода.

Во время сжигания в кислородной среде сначала удаляется азот из воздуха, после чего остается практически чистый кислород. Именно он используется для сжигания топлива. В этом случае дымовой газ состоит в большинстве своем из водяного пара и углекислого газа, который удаляется теми же методами, что и в случае улавливания после сжигания.

Опираясь на исследования Министерства энергетики США, можно сделать вывод о том, что наиболее безопасными, устойчивыми и доступными местами хранения CO_2 являются угольные пласты, залежи нефти и природного газа, базальтовые образования, соляные образования и сланцы, а также глубинные водоносные горизонты [2].

В таблице представлены результаты расчетов технико-экономических показателей для сценария использования CO_2 техногенного происхождения, полученного путем улавливания, для закачки в нефтяные пласты. Данный подход позволяет повысить нефтеотдачу и обеспечить экологически безопасную утилизацию парниковых газов.

Технико-экономические показатели

Наименование показателя	Значение
1. Объем добычи нефти в Республики Беларусь, млн т	1,9
2. Предполагаемый рост добычи нефти, млн т	0,304
3. Объем улавливания выбросов CO_2, млн т CO_2/год	1,0
4. Капиталовложения, млн у. е.	835,0
5. Чистый дисконтированный доход, млн у. е.	525,5
6. Внутренняя норма доходности, %	19,04
7. Простой срок окупаемости, лет	5,2
8. Динамический срок окупаемости, лет	7,2
9. Индекс доходности, о. е.	1,62
10. Коэффициент эффективности инвестиций, о. е.	0,163

Таким образом, закачка углекислого газа в нефтяные пласты позволяет утилизировать парниковые газы, повышает нефтеотдачу, обеспечивает рост добычи на уже действующих месторождениях.

Технология CCS будет актуальна до тех пор, пока все производство не станет безуглеродным. На сегодняшний день человечество не может полностью отказаться от выбросов CO_2, но с помощью разработки новых технологий может внести существенный вклад в сокращение выбросов углекислого газа. Данная технология позволяет использовать существующую энергетическую инфраструктуру с гораздо меньшим вредом для окружающей среды. Специалисты Международного энергетического агентства считают, что к 2050 г. доля углекислого газа, устраняемого с помощью технологии улавливания углерода, должна составлять одну пятую от общего объема снижения выбросов.

Литература

1. Технология улавливания и геологического хранения углерода // Helion-Ltd. – URL: https://helion-ltd.ru/tehnologiya-ulavlivaniya-igeologicheskogo-hraneniya-uglekislogo-gaza/ (дата обращения: 15.03.2026).
2. Best Avialable Technology // Association of European Businesses. – URL: https://aebrus.ru/upload/iblock/4ab/4ab6540c0371af467-e429ac892c68a30.pdf/ (дата обращения: 15.03.2026).

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЗЕМНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

М. В. Муравьева

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

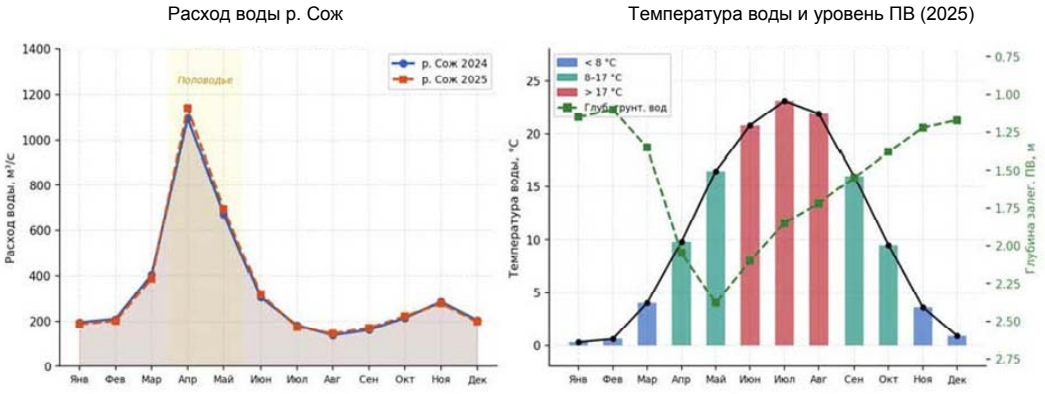
Научный руководитель Е. Н. Макеева

Отображены результаты анализа сезонной изменчивости гидрологических и гидрохимических показателей поверхностных и подземных вод Гомельской области. Рассмотрен режим стока основных вод, а также влияние температурного режима на поверхностные воды.

Ключевые слова: поверхностные воды, подземные воды, Гомельская область, грунтовые воды, р. Сож, р. Припять.

Гомельская область имеет разветвленную водную сеть: более 560 рек (9 200 км), свыше 2 500 водоемов и болотные массивы (~ 13 % территории). Ключевые реки города – Сож, Припять, Березина, Беседь, Ипуть, Птичь. Подземные воды содержатся в горных породах трех разных геологических возрастов: четвертичных (Q_4), палеогеновых (Pg) и меловых (K) водоносных горизонтах; прогнозные ресурсы – 2,8 км^3/год. Мониторинг ведется на гидрометрических постах, пунктах качества воды и наблюдательных скважинах.

Надземные (поверхностные) воды (2025 г.). Режим стока определяется умеренно-континентальным климатом с тремя фазами: весеннее половодье (март–май), летне-осенняя межень (июнь–октябрь) и зимняя межень (ноябрь–февраль). В 2025 г. пик половодья на р. Сож зафиксирован в апреле – 1140 м^3/с, что на 4 % выше среднего 2019–2024 гг. (1095 м^3/с); летняя межень – 145–175 м^3/с. Температура воды в июле достигла 23,1 °С – на 0,3 °С выше нормы, что соответствует тренду потепления (+0,06 °С/год с 2010 г.).

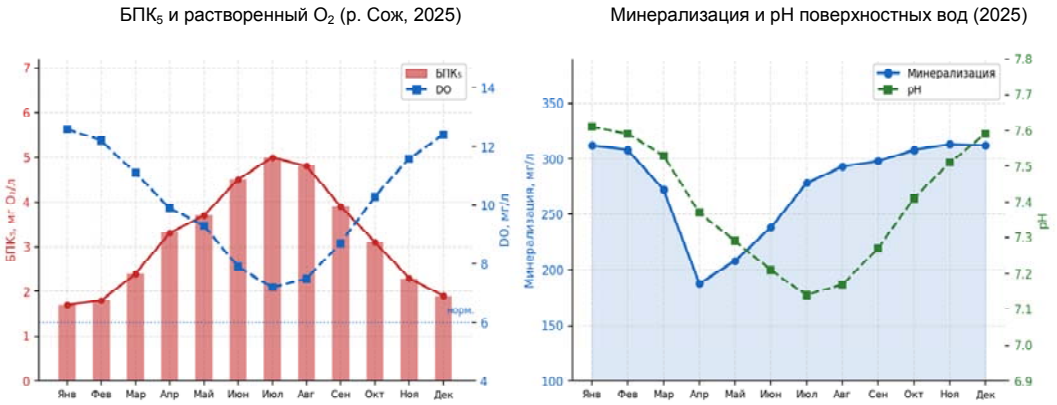


а) *б*)

Рис. 1. Расходы, температура воды и уровень грунтовых вод: *а* – расходы воды р. Сож (2024–2025 гг.); *б* – температура воды и уровень грунтовых вод (2025 г.)

Кислородный режим удовлетворяет рыбохозяйственным нормативам (DO ≥ 6 мг/л) в течение всего года. Минимум DO в июле – 7,2 мг/л, максимум $БПК_5$ – 5,0 мг O_2/л (умеренно загрязненные, III класс). Большинство рек, по данным Гомельского областного

комитета природных ресурсов и охраны окружающей среды, приняты удовлетворительными, однако в р. Припять в 2025 г., в сравнении с 2024 г., отмечено ухудшение экологического состояния поверхностных водных объектов в трех районах области: Лельчицком (р. Свиновод), Ельском (р. Словечно), Житковичском (р. Случь). В р. Сож минерализация снижается в половодье до 188 мг/л вследствие разбавления талыми водами, в межень возрастает до 312 мг/л (грунтовое питание). Весенний пик мутности достигает 72 НТЕ при концентрации взвешенных веществ до 115 мг/л.



а) *б*)

Рис. 2. Концентрация веществ в воде:
а – $БПК_5$ и растворенный кислород; *б* – минерализация
и pH поверхностных вод (р. Сож, 2025 г.)

Таблица 1

Сезонные показатели надземных вод р. Сож (г. Гомель), 2025 г.

Показатель	Зима	Весна	Лето	Осень	Норматив
Температура воды, °C	0,3–0,6	4,0–16,5	20,8–23,1	3,6–16,0	–
DO, мг/л	12,2–12,6	9,3–11,1	7,2–7,9	8,7–11,6	≥ 6,0
$БПК_5$, мг O_2/л	1,7–1,9	2,4–3,7	4,5–5,0	2,3–3,9	≤ 3,0
pH	7,59–7,61	7,29–7,53	7,14–7,21	7,27–7,51	6,5–8,5
Минерализация, мг/л	308–312	188–272	238–293	298–313	≤ 1000
Мутность, НТЕ	8–9	22–72	9–14	12–20	≤ 20
NO_3^-, мг/л	1,2–1,3	2,0–3,8	2,0–2,8	1,5–1,8	≤ 45
Класс качества	I–II	II	II–III	II	–

Примечание. Класс качества по ГОСТ 17.1.2.04. Q_4 – четвертичный горизонт; Pg – палеогеновый.

Подземные воды (2025 г.). Уровень грунтовых вод Q_4 в 2025 г. изменялся в диапазоне 1,10–2,38 м с максимальным подъемом в феврале–марте и наибольшей глубиной залегания в июне–июле. Амплитуда сезонных колебаний – 1,28 м. Палеогеновый горизонт значительно стабильнее: амплитуда 0,46 м; меловой – 0,06 м.

Химический состав подземных вод – гидрокарбонатно-кальциевый. Минерализация 405–428 мг/л (стабильнее, чем у поверхностных в 8–10 раз); жесткость 8,4–9,3 ммоль/л (очень жесткая). Содержание $Fe_{общ}$ в летний период достигает 0,24–0,30 мг/л – вблизи ПДК 0,3 мг/л, что требует контроля на водозаборах. Нитраты не превышают 2,3 мг/л (ПДК = 45 мг/л). Растворенный кислород в межпластовых водах < 0,8 мг/л – восстановительная среда.

Таблица 2

Сезонные характеристики подземных вод Гомельской области, 2025 г.

Показатель	Зима	Весна	Лето	Осень
Глубина залегания Q_4, м	1,10–1,20	1,35–2,40	1,72–2,38	1,22–1,55
Глубина залегания Pg, м	3,44–3,48	3,50–3,90	3,68–3,82	3,46–3,58
Минерализация, мг/л	418–422	405–418	420–428	415–420
Жесткость, ммоль/л	8,8–9,0	8,4–8,6	9,0–9,3	8,7–8,9
$Fe_{общ}$, мг/л	0,17–0,20	0,20–0,25	0,24–0,30	0,18–0,22

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Расход р. Сож в апреле 2025 г. (1 140 $м^3$/с) превысил среднемноголетнее значение на 4 %; температура воды в июле (23,1 °С) – на 0,3 °С выше нормы, отражая региональный тренд потепления.

2. Качество поверхностных вод в зимне-осенний период соответствует I–II классу; в июле–августе – II–III классу по показателям $БПК_5$ и мутности. Нарушений рыбохозяйственных нормативов по DO не зафиксировано.

3. Уровень грунтовых вод Q_4 изменяется с амплитудой 1,28 м; межпластовые и артезианские воды стабильны (0,46 м и 0,06 м соответственно). Содержание Fe в летний период приближается к ПДК в 18 % скважин – необходим усиленный контроль.

4. Минерализация поверхностных вод (188–312 мг/л) в 1,5–2,0 раза ниже, чем подземных (405–428 мг/л). Сезонная стабильность химического состава подземных вод подтверждает их надежность как источника хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Литература

1. Ежегодник качества поверхностных вод РБ за 2025 г. — Минск : Белгидромет, 2025.
2. Мониторинг подземных вод РБ / РУП «Белгеология». — Минск, 2025.
3. Государственный водный кадастр РБ. — Минск : Белгидромет, 2024.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ БЕЛАРУСИ И ВЫБОР ИХ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

К. В. Грицкова, Н. С. Махов

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель Д. А. Секацкий

Рассмотрена проблема выравнивания графиков нагрузки и предложен метод использования кинетических накопителей энергии. Приведен расчет и анализ использования предложенного метода в условиях смоделированного грузового терминала.

Ключевые слова: выравнивание графика нагрузки, кинетические накопители энергии, грузовой терминал, рекуперация, энергоэффективные технологии.

Современная энергетическая отрасль уделяет особое внимание проблеме выравнивания графиков нагрузки различных потребителей. Это позволяет снизить необходимую выработку электроэнергии для снижения потребления удельного топлива, излишних расходов на простой оборудования и увеличения надежности работы за счет возможной компенсации пиков потребления. Этим вопросом занимаются как предприятия электрической сети, так и крупные промышленные потребители. В данной работе будет представлен метод использования кинетических накопителей энергии.

Для анализа и дальнейших расчетов будет рассмотрен терминал, смоделированный на основе ТЛЦ «Колядичи» и «Орша-Восточная» [1]. Грузовой участок состоит из пяти кранов, три из которых («1»–«3») имеют грузоподъемность 36 т и максимальную номинальную мощность 380 кВт. Кран «1» обслуживает второй путь, используемый при высокой загруженности терминала, краны «2», «3» занимаются погрузкой составов первого пути. Кран «4» с грузоподъемностью 40 т и кран «5» с грузоподъемностью 55 т обслуживают третий путь и имеют максимальную номинальную мощностью 400 и 440 кВт соответственно. В качестве груза рассматривается два типа транспортных контейнеров стандарта ISO 668 длиной 20 и 40 футов с максимальной загрузкой брутто 30480 кг. Условный операционный цикл грузового крана длится 8 минут и разбивается на интервалы в 2 минуты, его составляющие представлены в таблице.

Условный операционный цикл козлового крана

Номер операции	Наименование операции	Длительность, мин
1	Подъем груза	2
2	Перемещение контейнера	2
3	Опускание груза	2
4	Ожидание	2

В данной работе рассматривается конфигурация КНЭ в виде готовых модулей промышленного производства [2] с установленной максимальной мощностью 600 или 300 кВт и емкостью 4 кВт · ч. Внутри такого модуля смонтирована вакуумная камера с маховиком, генератор и необходимая программируемая автоматика. Для потребителей, требующих большей емкости, модули можно объединять в группы. Исходя из приведенного цикла работы крана, рассчитывается целевое время отдачи мощности, по которому находится целевая мощность компенсации, и далее необходимый для выбора модулей параметр – оптимальная мощность отдачи КНЭ. Модули выбираются так, чтобы на каждом кране их емкость отдачи соответствовала оптимальному значению. В результате расчета для кранов «1»–«4» необходимо установить по два накопителя энергии, для крана «5» – три модуля.

Таким образом, ключевыми параметрами подбора и настройки накопительной системы являются значения целевой мощности компенсации и максимальной мощности зарядки накопителей. Целевая мощность компенсации $P_{\text{цел}}$ – это условный уровень потребления мощности из сети, к которому система накопления стремится привести потребление парка в моменты пиковой его нагрузки. В практическом расчете данная величина определена как некоторая часть от максимальной номинальной мощности крана:

$$P_{\text{цел}} = k_{\text{цел}} P_{\text{ном}}^{\max},$$

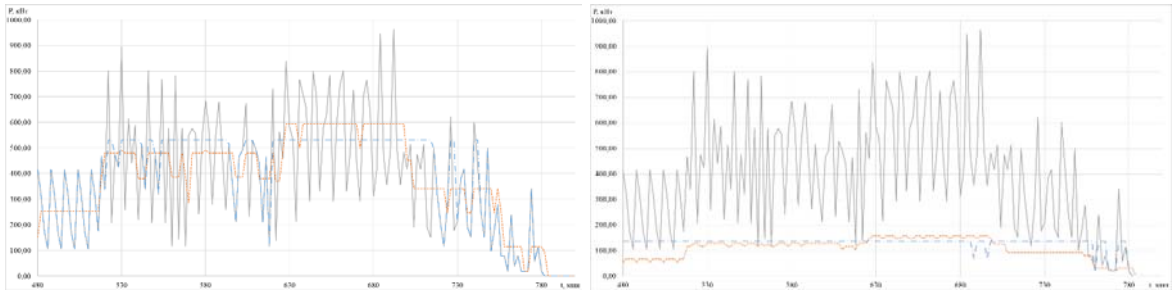
где $k_{\text{цел}}$ – коэффициент целевой мощности.

Значение целевой мощности напрямую определяет необходимую пиковую отдачу КНЭ, а также общую емкость модулей. При слишком малой выбранной $P_{\text{цел}}$ в периоды продолжительной высокой нагрузки накопители не смогут полностью восстанавливать уровень запасенной энергии между пиками потребления, что приведет к неполной компенсации либо полному отсутствию сглаживания. Слишком большое же значение целевой мощности не позволит полным образом реализовать всю запасенную в КНЭ энергию, а также оставит большое пространство для «просадки» потребления в моменты, когда краны осуществляют менее энергоемкие операции. Для рассматриваемого грузового терминала и выбранной конфигурации оборудования оптимальным значением коэффициента целевой мощности определено $k_{\text{цел}} = 0{,}3$.

Параметр максимальной мощности зарядки накопителей $P_{\text{зар}}^{\max}$ определяет максимальную мощность, которую система КНЭ может забирать из сети в моменты зарядки. Данная величина наиболее важна при использовании КНЭ с кранами без рекуперации энергии, поскольку в таком случае вся мощность зарядки забирается из сети. Слишком большая $P_{\text{зар}}^{\max}$, в сумме с потреблением самих кранов, может оказаться соразмерной или даже больше целевой мощности компенсации, что негативно скажется на равномерности итогового графика нагрузки. Слишком же маленькая мощность зарядки будет препятствовать восполнению запаса энергии КНЭ, что потребует установки большего числа накопительных модулей. Другим немаловажным фактором являются технические ограничения самого модуля КНЭ, согласно которым максимальная мощность зарядки составляет 80 % от максимальной мощности отдачи модуля. На основании данных требований было определено, что оптимальным значением $P_{\text{зар}}^{\max}$ для рассматриваемого цикла работы крана является разность между целевой мощностью компенсации $P_{\text{цел}}$ и потреблением крана в режиме ожидания $P_{\text{ожид}}^{\max}$:

$$P_{\text{зар}}^{\max} = P_{\text{цел}} P_{\text{ожид}}^{\max}.$$

После определения всех параметров и настройки оптимального режима компенсации, конфигурация системы с отдельными КНЭ для каждого потребителя позволяет снизить пиковую суммарную нагрузку на 39% (рис. 1, *а*).



а) *б*)

Рис. 1. Графики суммарной нагрузки грузового терминала:
а – график нагрузки без рекуперации; *б* – график нагрузки с использованием рекуперации (сплошная линия – нагрузка без использования накопителей, пунктирная – с отдельными КНЭ, штрихпунктирная – с общей системой накопления)

Определенный интерес представляет возможность установки общей системы КНЭ большей мощности на общую шину всех потребителей [3]. В рассматриваемом случае применение такой конфигурации требует увеличения максимальной мощности отдачи установки до 900 кВт, что достигается комбинированием модулей по 600 и 300 кВт. Оптимальное значение целевой мощности компенсации, как и в случае с конфигурацией из отдельных КНЭ, может сильно отличаться в зависимости от параметров конкретного графика нагрузок. В данном случае оно составило $k_{\text{цел}} = 0{,}55$. Из этого необходимое количество модулей $N_{\text{КНЭ}} = 11$, что соответствует суммарному количеству модулей при их отдельной установке.

Полученный график нагрузки (рис. 1, *а*), кроме более высокой, по сравнению со случаем отдельной установки, целевой мощности компенсации, имеет также значительно большую неравномерность. Ввиду этого можно сделать вывод о нецелесообразности применения конфигурации с общим накопителем для систем без рекуперации энергии.

Использование технологии рекуперации в последние годы находит все более широкое применение во всех подъемных механизмах. В современных моделях кранов режим рекуперации при опускании груза способен «возвратить» в сеть свыше 80% энергии, потраченной на его подъем. В данной работе именно это значение определяет мощность рекуперации крана:

$$P_{\text{рекуп}} = 0{,}8P_{\text{под}}.$$

Очевидно, что при условии наличия накопителей достаточной емкости, рекуперация энергии позволит применить еще более низкий коэффициент целевой мощности. В рассматриваемом случае для такого режима оптимальным оказалось значение $k_{\text{цел}}^{\text{рекуп}} = 0{,}08$. Разумеется, такой коэффициент требует установки дополнительного оборудования [2]: по три модуля КНЭ для кранов «1»–«4», и четыре модуля для крана «5», а также увеличения максимальной мощности отдачи КНЭ до 600 кВт. Однако данные нововведения позволят уменьшить пиковое потребление терминала на 84 %, и существенно выровнять весь суточный график.

Использование общей системы КНЭ вместо отдельных модулей в случае с применением рекуперации показывает значительно лучший результат: при использовании всего 8-ми модулей (против 16-ти в случае отдельной установки) с максимальной мощностью отдачи 900 кВт и выбранным коэффициентом целевой мощности $k_{\text{цел}}^{\text{рекуп}} = 0{,}14$ полученный график нагрузки (рис. 1, *б*) имеет вид горизонтальной прямой с несколькими «провалами» в потреблении.

Таким образом, разработанная в ходе исследования методика позволяет относительно просто определить оптимальную конфигурацию и параметры систем кинетических накопителей энергии для заданной группы потребителей, а также рассмотреть различные варианты установки. На основании полученных для используемой модели данных можно заключить, что в системах без рекуперации энергии более рационально устанавливать отдельные КНЭ на линии потребителей (полученный график имеет коэффициент заполнения $k_{\text{зап}} = 0{,}51$), в то время как при использовании рекуперации общая система накопителей оказывается более эффективной как по количеству оборудования, так и по качеству сглаживания ($k_{\text{зап}}^{\text{рекуп}} = 0{,}73$).

Литература

1. Силивонов, Е. А. Обеспечение устойчивого обслуживания грузовых районов станции Колядичи / Е. А. Силивонов // Тихомировские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 20–21 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т транспорта ; редкол.: А. А. Ерофеев (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2023. – С 278–282.
2. Collins, Ted. Flywheel Energy Storage / Ted Collins, Steven A. Parker // Federal Technology Alert / U. S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. – 2023. – N DOE/EE-0286. – 16 p.
3. Novel load forecasting and optimal dispatching methods considering demand response for integrated port energy system / Ruoli Tang [et al.] // J. of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13. – N 3/421. – 26 p.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ПО ВЕЛИЧИНЕ СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯТОРАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

А. Н. Лесота, Д. А. Карпейчик, Я. А. Субоч, Н. С. Макаренко

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель Д. А. Секацкий

Массовые аварии на линиях воздушных электропередач (ЛЭП) в зимний период 2025–2026 гг. показали энергетической отрасли Республики Беларусь необходимость учета фактора солевых отложений на изоляторах. Наибольший ущерб получили линии, расположенные вблизи крупных магистралей и МКАДа. Все это из-за активной обработки дорог противогололедными реагентами на основе хлорида натрия и кальция. Соль, вступая в реакцию вместе с частичками бетона, пыли и сажи, оседает на изоляторах [1]. Вследствие этого на изоляторах ЛЭП образуется плотная корка, которая создает токопроводящие пути. Предлагаемое решение – снижение аварийных ситуаций в зимний период на линиях электропередач в Беларуси путем внедрения мониторинга солевых отложений на изоляторах; расчет и прогнозирование времени эксплуатации изоляторов с помощью математической модели тока утечки.

Ключевые слова: солевое загрязнение изолятора, мониторинг солевых отложений, математическая модель тока утечки, нормальный изолятор, загрязненный изолятор.

Для решения данной проблемы был произведен расчет токов утечки для нормального и загрязненного изоляторов. В качестве основного изолятора был выбран ПС-70Е, представленный на рис. 1.

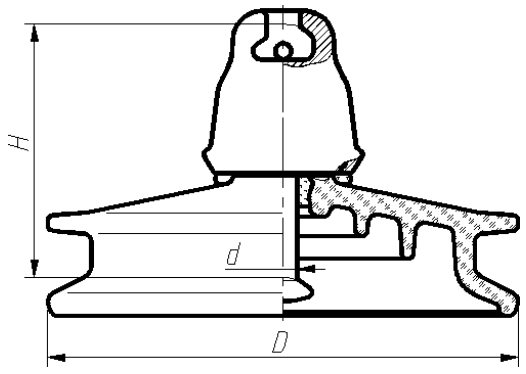


Рис. 1. Стеклянный двухкрылатый изолятор ПС-70Е

Основные характеристики для расчета тока утечки были взяты из паспортных данных изолятора ПС-70Е [2]:

– номинальное напряжение: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ;

– рабочее трехфазное напряжение: $U = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = 5{,}8$ кВ;

– длина пути утечки: $H = 303$ мм;

– диаметр тарелки изолятора: $D = 255$ мм;

– средний диаметр тарелки изолятора: $D_{\text{ср}} = 185$ мм;

– эмпирический коэффициент (для стекла): $k = 0{,}08$ мм;

– показатель степени: $m_{\text{NaCl}} = 0{,}95$ мм – эквивалентная толщина слоя поверхностной пленки раствора NaCl;

– критическая плотность загрязнения (70 %): $\gamma = 0{,}07$ мг/см^2.

Для II степени загрязнения атмосферы (СЗА) по ГОСТ 9920-89 плотность загрязнения будет принята: $\gamma = 0{,}01$ мг/см^2 [3].

Чтобы рассчитать ресурс через соль, найдем ток в плотности соли. Для этого будем использовать формулу связи тока I_h и плотности загрязнения γ [4]:

$$I_h = kU\gamma^m \frac{\pi D_{\text{ср}}}{H}.$$

Для нормального изолятора (ток утечки не вызывает деградаций и $\gamma = 0{,}01$ мг/см^2):

$$I_{h\text{норм}} = 0{,}08 \cdot 5\,800 \cdot 0{,}01^{0{,}95} \frac{3{,}14 \cdot 18}{30{,}3} = 9{,}5 \text{ мА}.$$

Для загрязненного изолятора ($\gamma = 0{,}06$ мг/см^2):

$$I_{h\text{з}} = 0{,}08 \cdot 5\,800 \cdot 0{,}06^{0{,}95} \frac{3{,}14 \cdot 18}{30{,}3} = 58{,}6 \text{ мА}.$$

Для рассчета ресурса изолятора используем математическую модель накопленного заряда [5]:

$$Q = I_h T,$$

где T – период в секундах. За 90 дней (три месяца зимы) $T = 90 \cdot 24 \cdot 3600 =$ 7 776 000 с.

Для разных видов изоляторов накопленный заряд имеет свое предельное значение, зависящее и от срока службы. Так, для данного изолятора ПС-70Е, выполненного из стекла, $Q_{\text{пред}} \approx 500\,000$ Кл за 30 лет службы.

Далее найдем затраты ресурса для нормального загрязнения, где $\gamma = 0{,}01$ мг/см^2:

$$Q_{\text{норм}} = 0{,}0095 \cdot 7\,776\,000 = 73\,872 \text{ Кл}.$$

За три месяца доля от общего ресурса нормального загрязнения:

$$w = \frac{73\,872}{500\,000} = 14{,}7744\ \%.$$

Полученный процент считается допустимым износом.

Теперь затраты ресурса загрязненного изолятора при $\gamma = 0{,}06$ мг/см^2:

$$Q_з = 0{,}0586 \cdot 777\,600 = 455\,673{,}6 \text{ Кл.}$$

За три месяца доля от общего ресурса сильного загрязнения:

$$w = \frac{455\,673{,}6}{500\,000} = 91{,}134\ \%.$$

Сравним два состояния изолятора:

Для изолятора, находящегося в нормальном состоянии, расходуется ресурс, который эквивалентен 0,25 части года (то есть трем месяцам).

Для загрязненного изолятора износ за то же фактическое время составил бы:

$$T_{экв} = \frac{Q_з}{I_{норм}} = \frac{455\,673{,}6}{0{,}0095} = 47\,965\,642{,}102 \text{ с} = 1{,}52 \text{ года.}$$

Данная формула показывает, что срок службы загрязненного изолятора снижается на 1,5 года.

Для обеспечения необходимой надежности изоляции нами предложена следующая методика для контроля и проверки состояния изолторов:

1. Динамическое зонирование по местам особой опасности (объекты и участки сети, которые наиболее подвержены отрицательному воздействию соли). Зонирование также будет учитывать время года и текущие погодные условия.

2. Внедрение специализированных датчиков мониторинга, которые будут измерять токи утечки и передавать данные о текущем состоянии изоляторов.

3. Плановые проверки с частотой, зависящей от ранее определенной зоны [6].

Таким образом, предложенная методика оценки остаточного ресурса изоляции по величине солевых отложений позволит точнее определять необходимость замены изоляторов на ЛЭП и предсказывать выход из строя воздушных линий.

Литература

1. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Требования к содержанию территорий населенных мест, зон санитарной охраны источников водоснабжения, водоемов, пляжей» : СанПиН 2.1.3684-20. – Минск : Минздрав Респ. Беларусь, 2020. – 48 с. (в части применения противогололедных реагентов).
2. Изолятор линейный подвесной стеклянный ПС-70Е : ТУ 34-27-91-93. – Введ. 1993-01-01. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1993. – 12 с.
3. Классификация степеней загрязнения атмосферы : межгос. стандарт. – Введ. 01.01.1991. – Минск : Белстандарт, 1990. – 6 с.
4. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Нормы проектирования : ТКП 339-2022. – Введ. 01.07.2022. – Минск : Минэнерго, 2022. – 118 с.
5. Sumitomo Electric. DCIC-Q(t) Method for Evaluating Insulation Materials. – URL: https://global-sei.com/ (дата обращения: 17.03.2026).
6. Правила охраны линий электропередачи напряжением 220 кВ и выше : постановление Совета Министров Респ/ Беларусь от 28 сент. 2005 г. № 1074 (в ред. постановления от 15.06.2022 № 385) // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Минск, 2022.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6 кВ

А. Ю. Савченко

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

Научный руководитель А. О. Добродей

Рассмотрена модель перенапряжений на секции шин подстанции ПС-6 кВ с отходящими кабельными линиями при различных режимах заземления нейтрали на основе программного комплекса NI Multisim.

Ключевые слова: перенапряжения, осциллограммы, программный пакет, режимы нейтрали, компьютерное моделирование.

В настоящее время в Республике Беларусь электрические сети напряжением 6–35 кВ эксплуатируются с различными режимами нейтрали: изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль (нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор), резистивно-заземленная нейтраль [1].

Основным достоинством данных сетей является высокая степень надежности электроснабжения потребителей при однофазном замыкании на землю. Но слабая электрическая связь этих сетей с нулевым потенциалом земли неизбежно приводит к возникновению в сети значительных перенапряжений [2].

Высокая аварийность электрических сетей напряжением 6–35 кВ обуславливает актуальность задачи повышения надежности электроснабжения потребителей.

В данной работе выполнено компьютерное моделирование перенапряжений в сети 6 кВ при однофазном замыкании на землю в программном комплексе NI Multisim. По результатам моделирования получены осциллограммы переходных процессов при развитии перенапряжений, а также рассчитаны кратности перенапряжений при различных режимах работы нейтрали сети,

Для моделирования перенапряжений выбрана одна секция шин подстанции ПС-6 кВ с отходящими кабельными линиями (рис. 1).

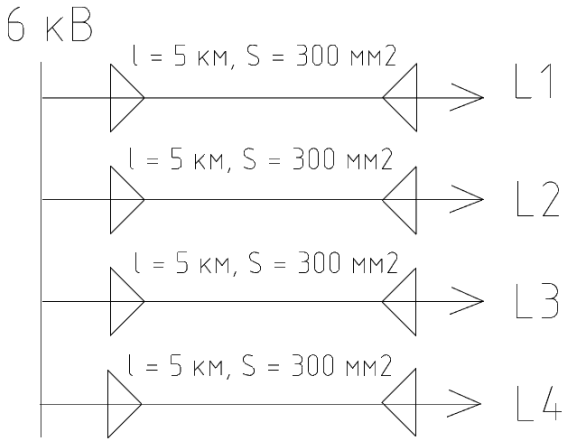


Рис. 1. Секция шин РУ-6 кВ подстанции

Рассчитав необходимые параметры схемы замещения и набрав ее в рабочую область программного комплекса (рис. 2), проведем анализ перенапряжений на моделируемой секции шин подстанции при замыкании фазы *C* на землю [3].

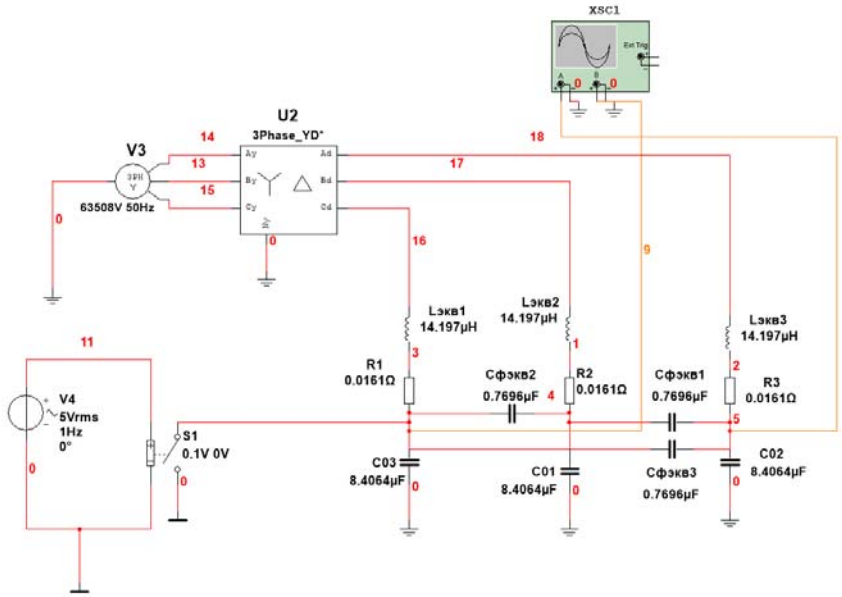


Рис. 2. Схема для моделирования перенапряжений при замыкании фазы *C* на землю

В результате моделирования в программном пакете NI Multisim получена осциллограмма напряжений в замкнутой фазе и одной из рабочих фаз (рис. 3).

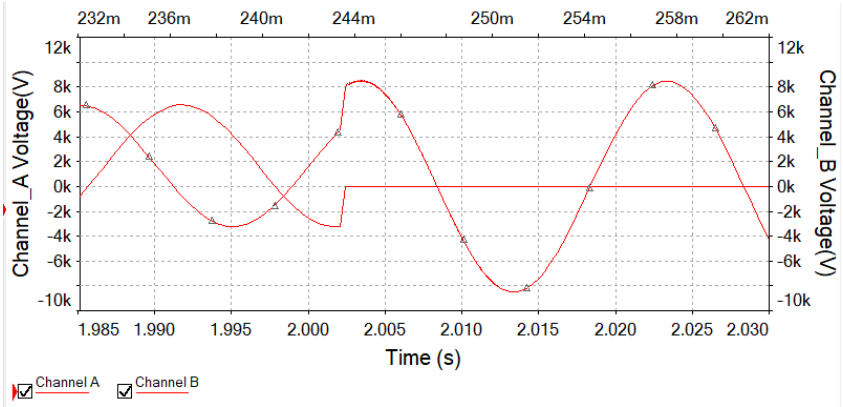


Рис. 3. Осциллограмма перенапряжений для замыкания фазы *C* на землю

По графику переходного процесса при замыкании фазы *C* на землю в сети с изолированной нейтралью зафиксирована амплитуда максимального перенапряжения $U_{\max} = 8567$ В, при амплитуде наибольшего рабочего напряжения = 3463 В.

Коэффициент перенапряжения вычисляется по выражению (1):

$$K = \frac{8567}{3463} = 2{,}47. \qquad (1)$$

По данным расчета коэффициент перенапряжений равен 2,47.

Длительность перенапряжения равна 0,115 с.

Аналогично проведем моделирования однофазных замыканий на землю фазы *C* для других режимов работы нейтрали. Результаты моделирования приведены в таблице.

Значения кратности и длительности протекания перенапряжений в сети при различных режимах заземления нейтрали

Режим нейтрали	$K_п$, о. е.	$T_п$, с
Изолированная нейтраль	2,47	0,109
Сеть заземления через резистор, рассчитанный по общей методике	2,47	0,109
Сеть, заземленная через низкоомный резистор	2,43	0,085
Сеть, заземленная через высокоомный резистор	2,35	0,0534

В данной работе проведено моделирование перенапряжений на секции шин подстанции ПС-6 кВ при различных режимах заземления нейтрали. При замыкании на землю получены осциллограммы переходных процессов при замыкании фазы *C* на землю. По осциллограммам рассчитаны кратности перенапряжений. Наибольшая кратность перенапряжений и длительный переходный процесс получен при изолированной нейтрали сети. Для снижения кратности перенапряжений в данной сети по результатам моделирования наиболее предпочтительным является режим нейтрали, заземленной через низкоомный резистор.

Литература

1. Руководство Multisim / National Instruments Corporation, 2007. – 491 с.
2. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Г. А. Евдокунин [и др.] ; под ред. Ф. Х. Халилова, Г. А. Евдокунина, А. И. Таджибаева. – СПб. : Энергоатомиздат. С.-Петерб. отд-ние, 2002. – 272 с.
3. Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6–35 кВ через резистор : СТП 09110.20.187–09. – Белэнерго, 2009. – 69 с.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АВТОКЛАСТЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Д. В. Чирко

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

Научный руководитель П. В. Лычев

Предложено при проведении мероприятий по повышению надежности линий 10 кВ применение автокластерных распределительных сетей 10 кВ вместо магистральной сети.

Ключевые слова: повышение надежности распределительных сетей, автокластерные сети 10 кВ.

Современная электроэнергетика переживает глубокую трансформацию. Рост потребления, интеграция возобновляемых источников энергии, повышение требований к качеству и надежности электроснабжения – все это требует перехода от традиционных распределительных сетей к интеллектуальным, гибким и автономным системам.

Одним из перспективных направлений развития является создание автокластерных распределительных электрических сетей – сетей, которые способны самостоятельно формировать и перестраивать свою структуру в зависимости от текущего состояния и внешних воздействий.

Надежность электроснабжения – ключевой показатель работы энергосистемы.

Рост требований к надежности электроснабжения. Современные потребители – от промышленных предприятий до частных домов – ожидают:

– минимального времени отключений;

– высокого качества электроэнергии;

– устойчивости к авариям и перегрузкам;

– гибкости при подключении новых объектов и ВИЭ.

Традиционные радиальные сети не справляются с этими задачами без масштабной модернизации.

Большая часть распределительных сетей в Беларуси, России и других странах СНГ была построена в XX в.

Характерные проблемы:

– отсутствие резервирования;

– ручное управление;

– слабая автоматизация;

– высокая аварийность в сетях 6–10 кВ.

Это приводит к росту показателей SAIDI (средняя длительность отключений) и SAIFI (частота отключений), особенно в сельской местности.

Мировая энергетика движется к интеллектуальным сетям (Smart Grid), где:

– каждый элемент сети – цифровой;

– управление – автоматическое и адаптивное;

– данные – собираются и анализируются в реальном времени.

Автокластерные сети – это локальный аналог Smart Grid, применимый к распределительным РЭС.

С каждым годом увеличивается количество:

– солнечных станций;

– ветровых установок;

– аккумуляторов;

– микрогенерации на объектах потребителей.

Без гибкой кластерной архитектуры такие источники сложно интегрировать в сеть без риска перегрузок и нестабильности.

Современные алгоритмы позволяют:

– анализировать состояние сети;

– выявлять слабые участки;

– оптимизировать маршруты питания;

– предсказывать аварии.

Автокластерная распределительная электрическая сеть – это интеллектуальная сеть, способная автоматически формировать, перестраивать и управлять локальными кластерами узлов и линий для повышения надежности, гибкости и устойчивости электроснабжения. Она объединяет цифровые технологии, алгоритмы ИИ и принципы Smart Grid.

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.

Идея автокластерных распределительных сетей заключается в преобразование радиальных сетей 10 кВ в автокластерные.

Основные их отличия – это разделение автоклатерных сетей на участки сравнительно небольшой длины с возможностью резервирования с разных сторон. Переключение осуществляется при помощи специальных безуставочных реклоузеров, которые не требуют дополнительной настройки при изменении топологии сети. Потребители 0,4 кВ подключаются к сети через компактные подстанции 10/0,4 кВ. А ввод питания в сеть осуществляется через компактные точки трансформации 35/10 кВ. Ее задачей является только ввести мощность в сеть в заданной точке, а роль распределительного устройства выполняет сама линия 10 кВ, что значительно повышает надежность сети, поскольку ранее авария в РУ 10 кВ могла привести к отключению всей подстанции, а в автокластерной данный аппарат отсутствует.

Так же данные реклоузеры с помощью средств связи, основанных на GSM–модемах, связаны с сервером и обмениваются с ним информацией, где происходит анализ данных в реальном времени. К.з. в данной сети локализуется при помощи соответствующих реклоузеров, которые передают все данные о линии в момент к.з. и локализуют поврежденный участок с точностью до нескольких опор.

Об эффективности данного метода можно судить по пилотному проекту Крымского РЭС, реализуемого на базе электрических сетей Сакского района электрических сетей (РЭС) ГУП РК «Крымэнерго» с привлечением ряда объектов Евпаторийских высоковольтных сетей (ВЭС). В пилотную зону проекта входят четыре подстанции ПС 35 кВ ГУП РК «Крымэнерго» и более 150 ТП.

Общая протяженность линий электропередачи, вошедших в «Цифровой РЭС» – 210,7 км (65,7 км воздушных линий электропередачи 35 кВ, 137 км воздушных линий электропередачи ВЛ 10 кВ, 8 км кабельных линий КЛ 10 кВ, включая сети ГУП РК «Крымэнерго» и потребительские сети).

В итоге выполненных в пилотном проекте работ удалось решить проблемы пилотной зоны:

– заменить критически изношенное коммуникационное оборудование;

– обеспечить нормативное качество электрической энергии для всех потребителей;

– обеспечить доступность трансформаторной мощности для всех потребителей;

– уменьшить нагрузочные потери на 52 %;

– уменьшить общие показатели времени ликвидации аварий на 37 %;

– уменьшение показателей надежности более чем в 8 раз.

По экономическим расчетам решение подобных проблем с использованием традиционных технологий обошлось бы оценочно вдвое дороже. При этом существенного улучшение 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.

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЮ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

А. С. Киречко

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

Научные руководители: Т. В. Алферова, С. Г. Жуковец

Рассмотрено комплексное решение задач по оперативному электроснабжению временных и удаленных потребителей на основе быстровозводимых электрических сетей (БЭС). Обоснована актуальность применения БЭС в условиях отсутствия стационарной сети или нецелесообразности использования дизельных генераторных установок. Приведены состав и технические характеристики комплекта БЭС, включая модульную мобильную подстанцию, трансформаторную подстанцию и специализированный кабель.

Ключевые слова: быстровозводимые электрические сети, модульные подстанции, временное электроснабжение, мобильные сети, модульный кабель МИП.

В условиях отсутствия возможности или недостаточного времени для подключения к стационарной электрической сети возникает необходимость электроснабжения потребителей. Такими потребителями могут являться абоненты небольшой мощности: вахтовые поселки на месторождениях природных ресурсов, строительные площадки, сельскохозяйственные объекты, временные объекты, развертываемые подразделениями МЧС.

Быстровозводимые электрические сети – это модульные системы электроснабжения, предназначенные для быстрого монтажа (1–7 дней), обеспечивающие быстрое электроснабжение для временных и постоянных объектов. Они собираются из модульных компонентов, таких как подстанции, кабельные линии и системы автоматизации, что позволяет завершить монтаж за 1–7 дней. Модульные электрические сети собираются из готовых компонентов, что делает их универсальными для стройплощадок, вахтовых поселков и жилых комплексов.

Назначение БЭС – комплексное решение задач по электроснабжению потребителя от стационарной сети, включая подключение, учет, передачу и распределение электроэнергии, или совместно с дизельными генераторными установками (ДГУ). Вместе с тем электроснабжение исключительно от дизель-генераторной установки не всегда экономически целесообразно. Дизельные генераторные установки требуют постоянного подвоза топлива и обслуживания, не всегда могут обеспечить требуемую категорию надежности и уровень шума, допустимый при проведении некоторых видов работ. С целью оперативной организации электроснабжения потребителей, как от удаленной электрической сети, так и совместно с дизель-генераторной установкой предлагается использование быстровозводимых электрических сетей (БЭС).

Рассмотрим актуальность быстровозводимых электрических сетей. В России такие сети востребованы в строительстве, удаленных регионах и промышленности, особенно в Москве, Якутии и Казани. Спрос на быстровозводимые сети в России растет на 10 % ежегодно, согласно данным Овен.

В состав комплекта БЭС входят:

– модульная мобильная трансформаторная подстанция (ММПС) 10/6/0,4 кВ (преобразование и распределение электроэнергии);

– устройство подключения БЭС к электрической сети под напряжением;

– линейная часть сети (кабельная или воздушная линия (провода СИП или модульные кабели МИП)).

Модульная мобильная трансформаторная подстанция размещается на автомобильном прицепе размером 3500 × 1500 мм общим весом 1200 кг и состоит:

– из высоковольтной ячейки РУ–10 кВ индивидуального изготовления;

– трансформатора напряжения 10/0,4 кВ мощностью от 25 до 250 кВ · А;

– распределительного силового щита 0,4 кВ;

– устройства быстрой размотки с кабельными барабанами;

– кабеля EXPERt class МИП (1 × 2,5 мм^2)-10 кВ общей длиной 3000 м;

– сборных опор высотой 6 м – 20 шт.;

– комплекта заземления;

– комплекта соединительных и концевых муфт;

– комплекта устройства подключения БЭС к электрической сети под напряжением.

Данный комплект позволяет построить сеть 10 кВ длиной 1 км. При расстоянии до точки подключения более 1 км в состав может включаться дополнительная кабельная сеть.

Возможности БЭС:

– установка соединительных и концевых муфт – 5 мин;

– вес сборной опоры высотой 6 м: 37 кг;

– скорость монтажа сети 10/6 кВ бригадой из 4–6 человек комбинированным способом составляет 5–10 км в день;

– передача мощности 25 кВт напряжением 10 кВ – на расстояние до 50 км;

– передача мощности 250 кВт напряжением 10 кВ – на расстояние до 5 км.

Быстровозводимые электрические сети можно классифицировать по трем видам:

– *стационарные*, используемые в качестве основного источника электроснабжения;

– *временны*е, используемые для решения задач по электроснабжению временных нужд;

– *мобильные*, применяемые в случае необходимости ускоренного монтажа с возможностью быстрого развертывания и свертывания сети [1].

На рис. 1 приведена схема подключения комплекта БЭС к электрической сети.

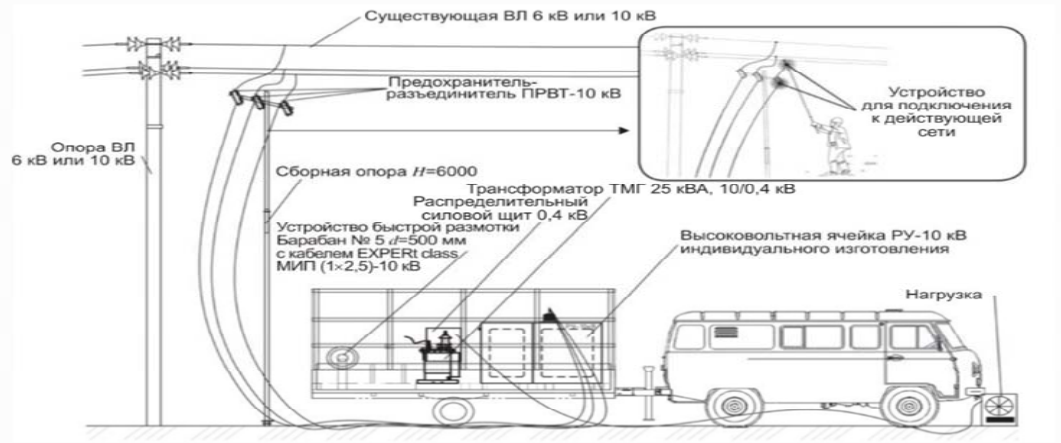


Рис. 1. Схема подключения комплекта БЭС

К преимуществам БЭС относят:

– быстрый монтаж электросетей: установка за 1–7 дней (выше в 2 раза);

– мобильные электрические сети: перенос на новый объект;

– экономия на электросетях: стоимость кабельной линии дешевле на 30 %;

– масса оборудования ниже в 2–3 раза;

– быстрое развертывание/свертывание кабельной линии;

– окупаемость в сравнение с ДГУ за 6–8 месяца;

– возможность установки сети без специальной техники.

Недостатками БЭС являются:

– ограниченная мощность (до 1 МВт), неподходящая для крупных объектов;

– качество компонентов: дешевые китайские аналоги могут быть менее надежны.

Варианты прокладки линейной части сети EXPERt class МИП 3 × (1 × 2,5 мм^2)-10 кВ приведены на рис. 2.

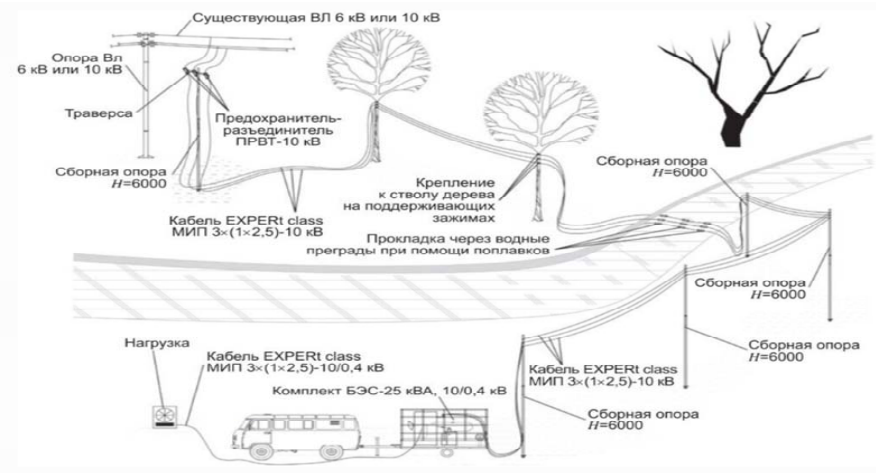


Рис. 2. Варианты прокладки линейной части сети EXPERt class МИП 3 × (1 × 2,5 мм^2)-10 кВ

В таблице выполнено сравнение БЭС и традиционных электрических сетей.

Сравнение БЭС и традиционных электрических сетей

Параметры	Быстровозводимые сети	Традиционные сети
Скорость монтажа	1–7 дней	1–6 месяцев
Мобильность	Высокая	Низкая
Стоимость	500,000–5 млн руб.	5–50 млн руб.
Мощность	До 1 МВт	Любая

В качестве примеров можно привести:

– вахтовый поселок в Якутии. В Якутии для вахтового поселка на месторождении была реализована БЭС, которая обеспечила электроснабжение 50 жилых модулей за 5 дней;

– стройплощадку в Москве. На строительной площадке жилого комплекса в Москве временное электроснабжение организовано за три дня с применением российских решений.

– логический центр в Казани. В Казани логический центр был подключен к БЭС с российским оборудованием.

– коттеджный поселок в Подмосковье. В Подмосковье коттеджный поселок на 30 домов получил постоянное электроснабжение через БЭС [2].

Таким образом, применение БЭС для комплексного решения задач по электроснабжению потребителей является перспективным направлением в энергетике.

Литература

1. Быстровозводимые электрические сети. – Москва, 2018–2026. – URL: https://expert-cable.ru/refs/bystrovozvodimye-elektricheskie-seti-bes/ (дата обращения: 15.02.2026).
2. Быстровозводимые электрические сети: технологии, преимущества и решения для быстрого электроснабжения. – Москва, 2026. – URL: https://energostrana.ru/publications/bystrovozvodimye-elektricheskie-seti texnologii-preimushhestva-i-resheniya-dlya-bystrogo-elektrosnabzheniya.html (дата обращения: 15.02.2026).

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОПОТРЕБЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ ОТ ВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЙ

В. М. Спитальников

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

Научный руководитель А. А. Капанский

Настоящее исследование посвящено анализу влияния сезонных факторов на режимы потребления природного газа на примере Гомельской региональной системы газоснабжения. Исследование базируется на статистических данных с суточной дискретностью за период более 10 лет. Для учета структурной неоднородности системы и снижения размерности исходных данных предложен подход, предусматривающий объединение потребителей в укрупненные балансовые группы с последующим раздельным анализом. В результате выполненного анализа выделены группы потребителей, в наибольшей степени подверженные влиянию сезонного фактора, а также группы, демонстрирующие устойчивость к его воздействию. Полученные результаты могут служить основой при построении моделей прогнозирования газопотребления в региональных системах газоснабжения.

Ключевые слова: газопотребление, региональная система газоснабжения, временные факторы, сезонность, балансовые группы, прогнозирование.

Целью исследования является анализ структуры баланса использования природного газа и выявление закономерностей его формирования на уровне укрупненных балансовых групп системы газораспределения Республики Беларусь, в частности исследование проводилось по Гомельской региональной системе газоснабжения.

Для анализа потребления природного газа Гомельской региональной системой газоснабжения (РСГС) использована база суточных данных за период с 2012 по 2023 гг. газоснабжающей организации региона РПУП «Гомельоблгаз». Для обеспечения сопоставимости данных и последующего статистического анализа исходная информация по отдельным потребителям была агрегирована в пять укрупненных балансовых групп: «Энергетика», «Промышленность», «Население», «Сельское хозяйство» и «Минжилкомхоз» (рис. 1).

Рис. 1. Структура укрупненных балансовых групп Гомельской региональной системы газоснабжения

Как показали результаты анализа наибольший вклад в региональное газопотребление вносят энергетический и промышленный секторы. На рис. 2 видно, что на энергетический сектор приходится более 50 % общего объема регионального газопотребления. Промышленный сектор с долей потребления природного газа 27 % охватывает предприятия, использующие природный газ в технологических процессах. Таким образом, именно эти две группы формируют основную часть потребителей природного газа исследуемого региона.

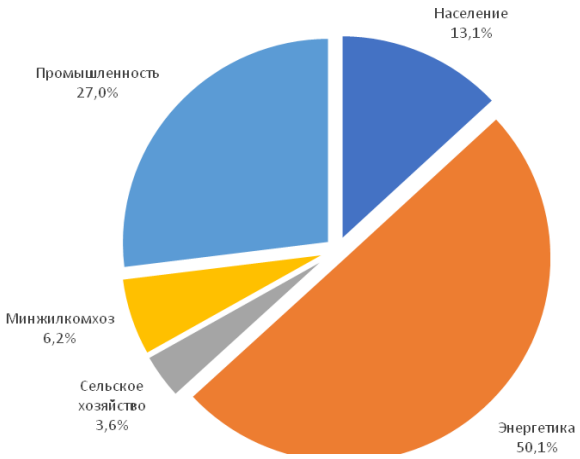


Рис. 2. Структура газопотребления укрупненных балансовых групп за исследуемый период

Группа «Население» формирует 13,1 % объема в балансе и отражает использование природного газа жилым фондом региона в основном для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищеприготовления. В свою очередь группа «Минжилкомхоз», на которую приходится 6,2 % регионального газопотребления, включает предприятия жилищно-коммунального хозяйства, использующие природный газ преимущественно на объектах теплоснабжения, прежде всего в районных котельных. К группе «Сельское хозяйство» отнесены потребители аграрного сектора, использующие природный газ в технологических процессах, в том числе для обогрева теплиц, сушки зерна и других производственных нужд с долей потребления порядка 4 %.

Такое структурирование газопотребления позволило выделить группы, различающиеся не только по доле в общем объеме спроса, но и по характеру использования природного газа.

На рис. 3 представлена структура потребления природного газа Гомельской РСГС по сезонам за 2023 г. Как следует из приведенной диаграммы, наибольшая доля газопотребления приходилась на зимний период и составила 27,7 %. Сопоставимое

значение 27,2 % наблюдалось и осенью, что объясняется началом отопительного периода и ростом тепловой нагрузки. В весенний и летний периоды доля потребления природного газа относительно снижалась, формируя 21,5 и 23,5 % соответственно.

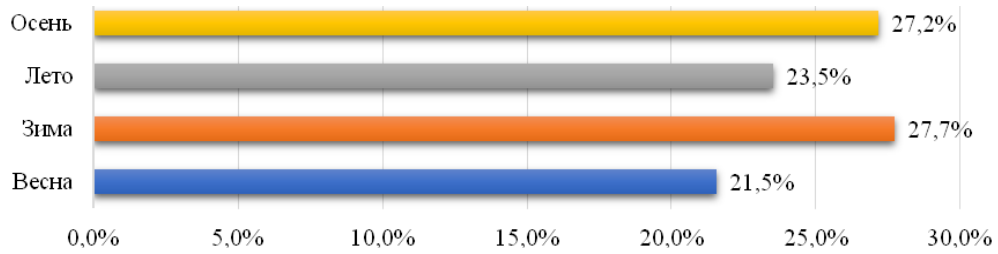


Рис. 3. Структура газопотребления по сезонам 2023 г.

Детальный анализ показал прослеживаемость роста потребления газа в осенне-зимний период и снижение в весенне-летний по группам «Энергетика», «Население», «Минжилкомхоз». При этом максимальные значения приходятся на зиму, тогда как в летний период потребление минимально. Такая динамика может свидетельствовать о том, что в указанных группах природный газ в осенне-зимний период используется преимущественно на нужды отопления и горячего водоснабжения, тогда как в весенне-летний это потребление частично прекращается. Можно отметить, что в осенне-зимний период прирост потребления газа по группе «Энергетика» по отношению к весенне-летнему составляет 32,6 %, по группе «Население» – 12,5 %, по группе «Минжилкомхоз» – 5,4 %.

Для групп «Промышленность» и «Сельское хозяйство» характерно относительно равномерное потребление газа в течение года. Вместе с тем в осенне-зимний период наблюдается прирост газа на 7,7 % для промышленного сектора и на 1,4 % для сельскохозяйственного. Это может свидетельствовать о том, что основная часть природного газа в данных отраслях используется в технологических процессах, тогда как в холодный период года дополнительный объем потребления связан в основном с отоплением производственных и административно-бытовых помещений. Из проведенного анализа следует, что влияние временных факторов на различные категории потребителей выражено неодинаково: для одних сезонность имеет существенное значение, тогда как для других режимы газопотребления остаются сравнительно устойчивыми в течение года.

Таким образом, проведенный анализ показал, что наибольший вклад в общий объем потребления вносит энергетический сектор, тогда как промышленность занимает второе место в структуре газового баланса. Для укрупненных балансовых групп «Энергетика», «Население» и «Минжилкомхоз» выявлена выраженная сезонная зависимость, проявляющаяся в росте потребления в осенне-зимний период и снижении в весенне-летний. Для групп «Промышленность» и «Сельское хозяйство» характерно более устойчивое потребление в течение года, что позволяет связывать основную часть спроса в этих сегментах с технологическими нуждами и меньшей зависимостью от температурного фактора. Анализ распределения газопотребления по дням недели показал, что недельная неравномерность выражена значительно слабее по сравнению с сезонной и не оказывают существенного влияния на структуру спроса.

Литература

1. Илькевич, Н. И. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения / Н. И. Илькевич, Т. В. Дзюбина, Ж. В. Калинина. – Новосибирск : Наука, 2014. – 217 с.
2. Моделирование равновесия потоков стоимости спроса и предложения на природный газ / Н. И. Илькевич, Т. В. Дзюбина, Ж. В. Калинина, С. Т. Окунева // Трубопроводные системы энергетики: методические и прикладные проблемы математического моделирования. – Новосибирск : Наука, 2015. – С. 318–332.
3. Прогноз потребления газа – основа принятия рациональных решений по структуре и технологическим параметрам при проектировании и реконструкции системы газоснабжения / Р. А. Кантюков, М. Г. Сухарев, В. П. Мешалкин [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 2. – С. 201–232. – URL: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p201-231_KantyukovRA_ru.pdf.
4. Грунтович, Н. В. О необходимости изучения структуры и закономерностей функционирования региональных систем газоснабжения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, В. Е. Шолоник / Энергетическая стратегия. – 2017 – № 1. – С. 42–46.
5. Баврина, А. П. Основные понятия статистики / А. П. Баврина // Медицинский альманах. – 2020. – № 3 (64). – С. 101–111.

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ДАВЛЕНИЯ

А. А. Чухар

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

Научный руководитель А. А. Капанский

Проведен анализ аварийных режимов в водопроводной сети города Гомеля. Собраны данные давления на повысительных насосных станциях и водозаборах. Построены графики давления и по ним выявлены аномальные режимы работы рассмотренных объектов.

Ключевые слова: система водоснабжения, анализ давления, аварии на трубопроводах.

В мировой практике инциденты в трубопроводных системах и объектах водоснабжения происходят с высокой регулярностью. Подобные аварии могут быть связаны с неисправностями на повысительных насосных станциях (ПНС) и водозаборах, а именно с вышедшим из строя насосным оборудованием либо датчиком давления. В связи с этим необходим анализ и классификация аварийных режимов на различных объектах путем сбора данных давления и их последующего мониторинга.

Целью данной работы является решение актуальной научной задачи в области водоснабжения, заключающейся в анализе и классификации аварийных режимов для последующего сравнения аномальных режимов работы между собой и исследования частоты аварий на объектах водопроводной сети города Гомеля.

В качестве источников данных использована система водоснабжения г. Гомеля, в которую вошли ПНС и водозаборы. Данные фиксировались ежеминутно. Для регистрации значений давления использовался датчик ПД100, оснащенный токовыми выходами 4–20 мА. Сбор, обработка, хранение и передача данных производились посредством программируемого контроллера для телеметрии RTU-810. Передача осуществлялась по протоколу Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) на облачный сервер для последующей обработки.

Принцип функционирования схемы сбора данных заключается в том, что датчики фиксируют значение давления, затем преобразовывают его в электрический сигнал, поступающий на программируемый контроллер для телеметрии RTU-810. Далее с использованием протокола MQTT осуществляется передача на облачный сервер для последующей обработки и хранения информации. На рис. 1 представлена визуализация принципа функционирования схемы сбора данных.

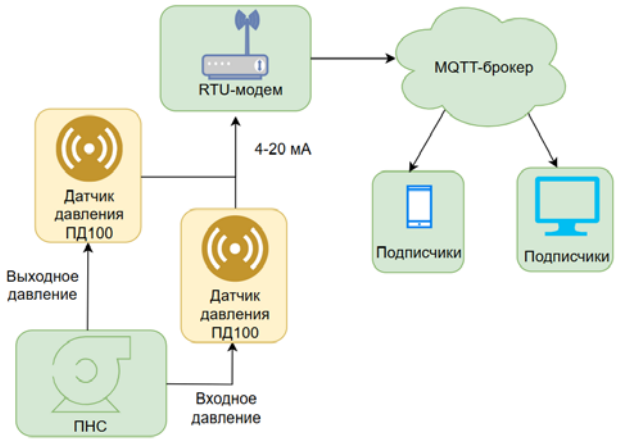


Рис. 1. Визуальное представление принципа функционирования схемы сбора данных

В исследовании представлены данные входного и выходного давления на ПНС, выходного давления водозабора Сож. В связи с этим приведен пример аварийного режима, изображенный на рис. 2.

Рис. 2. Пример аварийного режима ПНС по улице Волотовская, 6

Аварийные ситуации на объектах характеризовались повышениями и понижениями давления, варьирующимися от незначительных и кратковременных отклонений до глубокоих и долговременных аномалий. После получения данных с сервера к некоторым была применена медианная фильтрация, позволяющая устранить помехи, затрудняющие последующий анализ. На ПНС по ул. Волотовская, 6 наблюдалась некоторая нестабильность. Зафиксированы падения выходного давления до значений входного потока, а также глубокие провалы вплоть до нулевых значений. На ПНС

по ул. Головацкого, 21А фиксировалось выравнивание значений входного и выходного давления. В работе ПНС по улице пр-т Речицкий, 33А фиксировалось входное давление на уровне 300 кПа, а выходное на значениях около 500 кПа, однако впоследствии произошел резкий и глубокий спад давления. На водозаборе Сож зарегистрировано долговременное снижение давления с 400 до 100 кПа.

В дальнейшем в рамках данного исследовании предполагается сопоставить характеристику аварийных режимов, сформулированную человеком, с характеристикой, полученной с использованием большой языковой модели (LLM).

Литература

1. Intelligent methods of operational response to accidents in urban water supply systems based on lstm neural network models / A. A. Kapanski [et al.] // Smart Cities. – 2025. – Т. 8, № 2. – С. 59.
2. Kapanski, A. A. Climatic factors and their role in energy management and water consumption in the urban water supply system / A. A. Kapanski // Science & Technique. – 2025. – Т. 24, № 1. – С. 72–82.

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСВЕЩЕННОСТЬ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СВЕТОДИОДНЫМИ ЛАМПАМИ

Н. А. Подвойский

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

Научные руководители: О. Г. Широков, Т. В. Алферова

Экспериментально с помощью регулируемого источника напряжения, трех люксметров на расстояниях 50, 70 и 100 см от источника света определено влияние отклонений питающего напряжения на освещенность рабочей поверхности лампами накаливания и светодиодными лампами. Установлены зоны надежности ламп для условий нестабильного электроснабжения.

Ключевые слова: освещенность, отклонение напряжения, лампа накаливания, светодиодная лампа, люксметр.

Качество электроэнергии в современных распределительных сетях является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность работы электроприемников. Особое значение этот вопрос приобретает для систем освещения, где отклонения напряжения могут существенно влиять на освещенность рабочих поверхностей и, как следствие, на комфорт и безопасность труда.

Целью данного исследования является сравнительный анализ влияния отклонений напряжения питающей сети на освещенность рабочей поверхности при использовании ламп накаливания и светодиодных ламп. Для достижения цели были проведены экспериментальные измерения зависимости освещенности от напряжения в диапазоне от 60 до 230 В, что соответствует реальным условиям эксплуатации в распределительных сетях 220 В.

Лампы накаливания представляют собой тепловые источники света, в которых световое излучение возникает в результате нагрева вольфрамовой нити до высокой температуры (около 2500–3000 К) при прохождении через нее электрического тока. Световой поток такой лампы напрямую зависит от температуры нити накала, которая, в свою очередь, определяется мощностью, выделяемой в нити.

Светодиодные (LED) лампы работают на принципиально иной физической основе. Свечение светодиода происходит в результате рекомбинации электронов и дырок в p-n-переходе полупроводникового кристалла. Яркость светодиода определяется значением тока, протекающего через него, а не напряжением.

Для проведения экспериментального исследования были выбраны две лампы: лампа накаливания мощностью 25 Вт, номинальное напряжение 220 В, светодиодная лампа мощностью 15 Вт, номинальное напряжение 220 В.

Измерения проводились с использованием следующего оборудования: регулируемый источник переменного напряжения (ЛАТР) для изменения питающего напряжения в диапазоне 60–220 В, а также 3 люксметра для измерения освещенности на рабочей поверхности. Измерения освещенности выполнялись на горизонтальной рабочей поверхности, расположенной на расстоянии 100, 70, 50 см над люксметрами. Для каждого значения напряжения после стабилизации теплового режима лампы регистрировалось значение освещенности в люксах. На основании полученных данных для каждого типа ламп были определены зависимости освещенности рабочей поверхности от питающего напряжения и расстояния до рабочей поверхности. На рис. 1 и 2 показаны графические примеры зависимости освещенности от напряжения и расстояния для лампы накаливания, а на рис. 3 и 4 – примеры зависимости освещенности от напряжения и расстояния для светодиодной лампы. На рисунках L1, L2, L3 обозначены номера люксметров и соответствующие зависимости освещенности рабочей поверхности измеренные ими.

Как видно из рис. 1 и 2, лампа накаливания сохраняет работоспособность в широком диапазоне напряжений – от 60 В до номинального значения 220 В. Однако освещенность существенно зависит от напряжения: при снижении напряжения до 60 В освещенность значительно падает, что делает лампу практически непригодной для освещения. При напряжении 160 В освещенность составляет всего 50% от освещенности при 220 В.

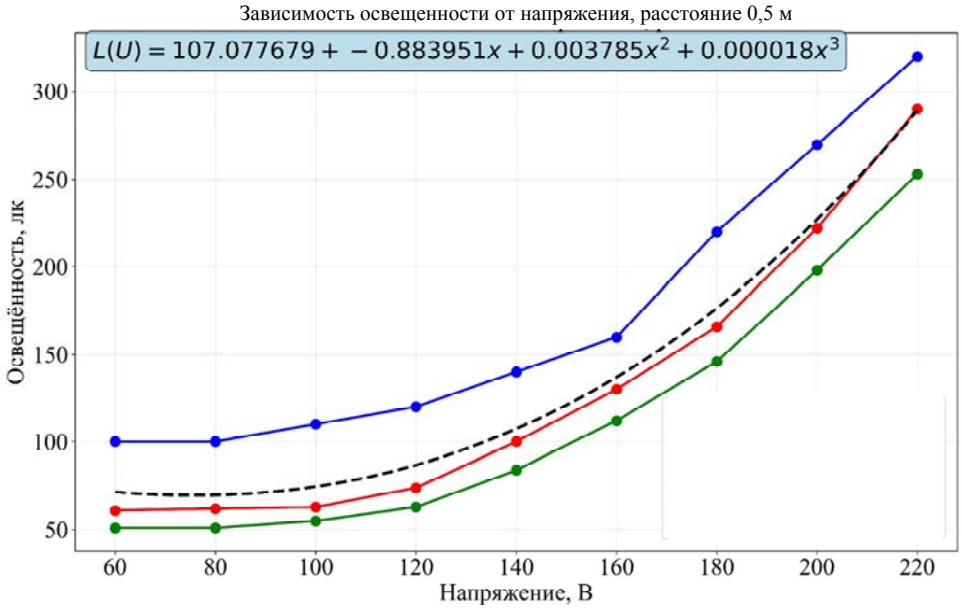


Рис. 1. Зависимость освещенности рабочей поверхности лампой накаливания от напряжения и расстояния от источника света до рабочей поверхности 0,5 м:
– L1; – L2; – L3; – полином 3 степени

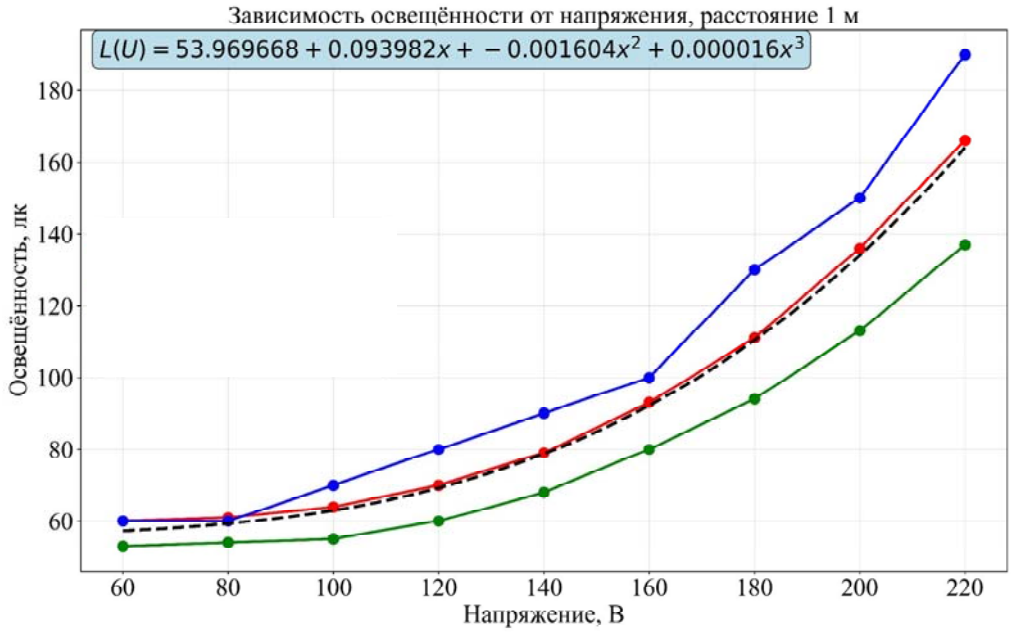


Рис. 2. Зависимость освещенности рабочей поверхности лампой накаливания от напряжения и расстояния от источника света до рабочей поверхности 1 м:
– L1; – L2; – L3; – полином 3 степени

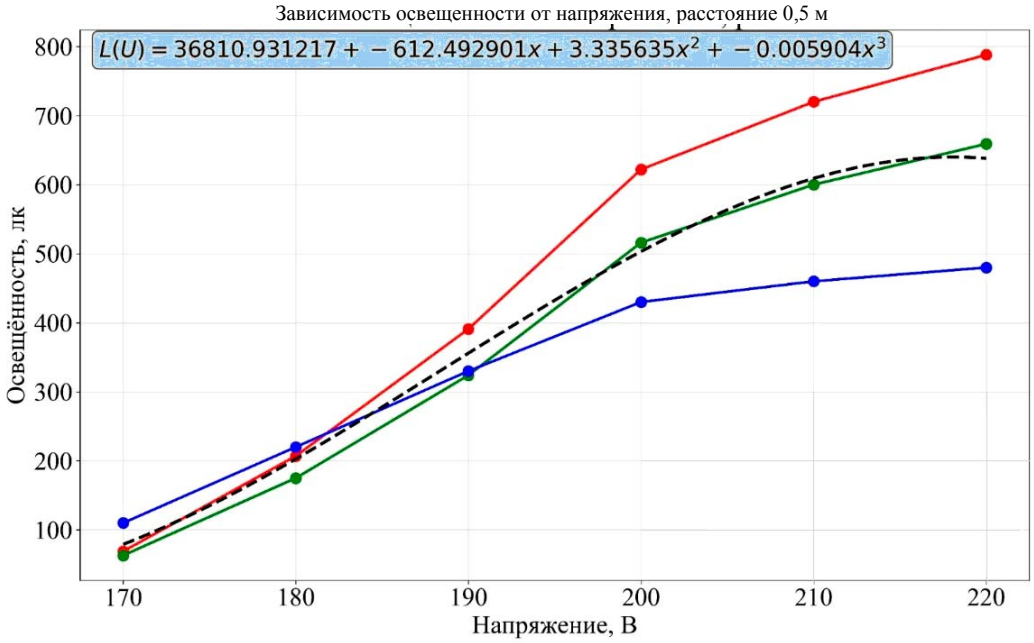


Рис. 3. Зависимость освещенности рабочей поверхности светодиодной лампой от напряжения и расстояния от источника света до рабочей поверхности 0,5 м:
– L1; – L2; – L3; – полином 3 степени

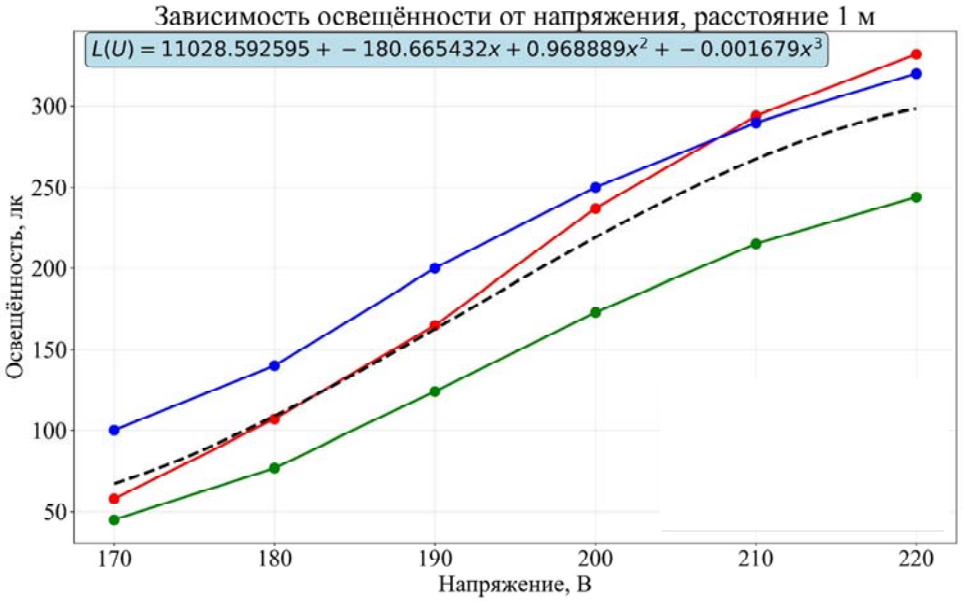


Рис. 4. Зависимость освещенности рабочей поверхности светодиодной лампой от напряжения и расстояния от источника света до рабочей поверхности 1 м:
– L1; – L2; – L3; – полином 3 степени

Проведенные опыты выявляют главную особенность светодиодной лампы: наличие порога включения. При напряжении ниже 160 В лампа полностью не работает, что связано с недостаточным напряжением для запуска встроенного драйвера. В диапазоне от 160 до 200 В наблюдается интенсивное мерцание светодиодной лампы, вызванное нестабильной работой драйвера при пониженном входном напряжении. Это принципиальное отличие от лампы накаливания, которая сохраняет работоспособность даже при очень низких напряжениях.

Литература

1. Электрическая энергия. Электрические сети общего назначения. Нормы качества электрической энергии : ГОСТ 32144-2013.
2. Правила устройства электроустановок. Гл. 6.1. Общая часть.
3. Влияние качества питающего напряжения на параметры искусственного освещения рабочего места // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 2. – С. 336–341. – URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33617.

ПОКАЗАТЕЛИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ПРИ ПИТАНИИ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ С ЭЛЕКТРОННОЙ ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРОЙ

П. Н. Лабушев

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

Научные руководители: О. Г. Широков, Т. В. Алферова

Проведено исследование влияния использования газоразрядных светильников с электронной пускорегулирующей аппаратурой на форму кривых напряжений и токов путем измерения мгновенных значений токов и напряжений с помощью виртуального измерительного прибора. Дальнейший анализ заключался в разложении напряжений и токов в гармонический

ряд и сравнении гармонических составляющих напряжений и токов с нормативно допустимыми. Полученные сведения могут быть использованы для дальнейшего выбора или замены осветительного оборудования с подобной аппаратурой.

Ключевые слова: коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока, суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока, газоразрядные светильники с электронной пускорегулирующей аппаратурой.

Газоразрядные источники света, такие как лампы высокого давления и люминесцентные лампы, являются источником освещения. Благодаря своей высокой светоотдаче и устойчивости к климатическим условиям, они массово эксплуатируются на крупных промышленных предприятиях, в тепличных хозяйствах, а также в сетях наружного освещения городов и магистралей. Однако эксплуатация данных светильников невозможна без пускорегулирующей аппаратуры (ПРА), которая, являясь нелинейной нагрузкой, вносит искажения в форму кривой тока и напряжения. В условиях износа распределительных сетей и жестких требований к качеству электроэнергии даже в Евразийском экономическом союзе, исследование этих искажений становится критически важным для обеспечения электромагнитной совместимости оборудования.

В качестве объекта исследования были выбраны лампы с электронной пускорегулирующей аппаратурой (ЭПРА), но различного конструктивного исполнения (серии ЛПП, ФПО и ЛПО).

Для получения объективной картины гармонического состава использовался метод цифровой регистрации мгновенных значений токов и напряжений. Для выполнения измерений воспользовались виртуальным измерительным прибором. На рис. 1–3 представлены осциллограммы напряжений и токов при работе соответствующих светильников. На основе полученных осциллограмм был проведен спектральный анализ в СКМ Excel.

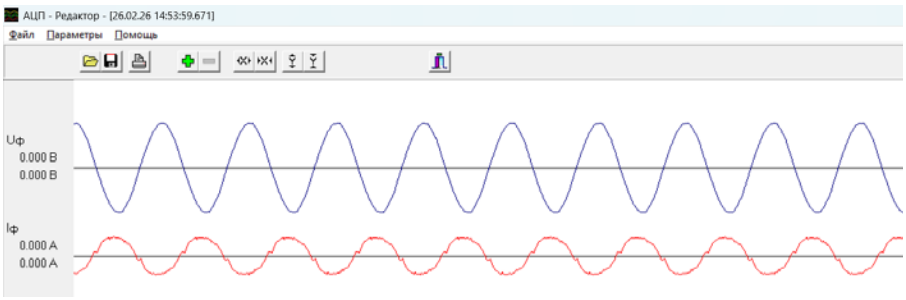


Рис. 1. Осциллограммы напряжений и токов при работе светильника серии ЛПП

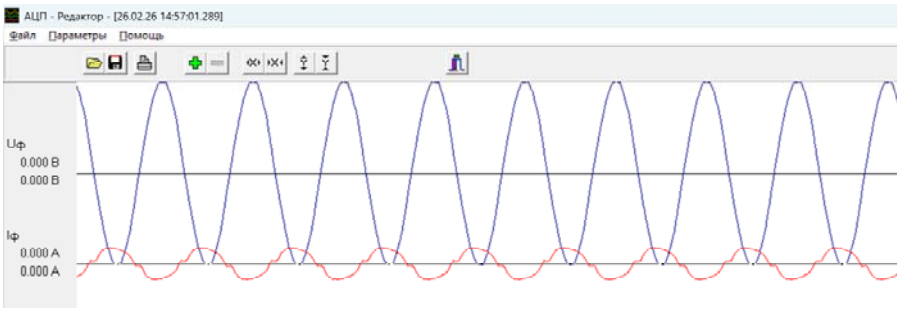


Рис. 2. Осциллограммы напряжений и токов при работе светильника серии ФПО

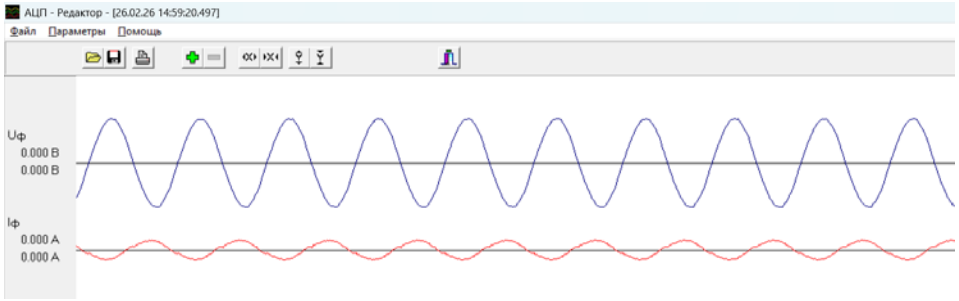


Рис. 3. Осциллограммы напряжений и токов при работе светильника серии ЛПО

Коэффициенты *n*-х гармонических составляющих напряжения определялись по формуле (1), и показывают, какую долю составляет амплитуда конкретной высшей гармоники относительно амплитуды основной частоты:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100\ \%. \tag{1}$$

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U и суммарный коэффициент гармонических составляющих тока THD_I определялись по следующим выражениям:

$$K_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{40}} \left(\frac{U_{H,h}}{U_{H,1}} \right)^2}; \quad THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{40}} \left(\frac{U_{H,h}}{U_{H,1}} \right)^2}. \tag{2}$$

На рис. 4 и 5 представлены коэффициенты *n*-х гармонических составляющих напряжения и тока при работе соответствующих светильников с ЭПРА.

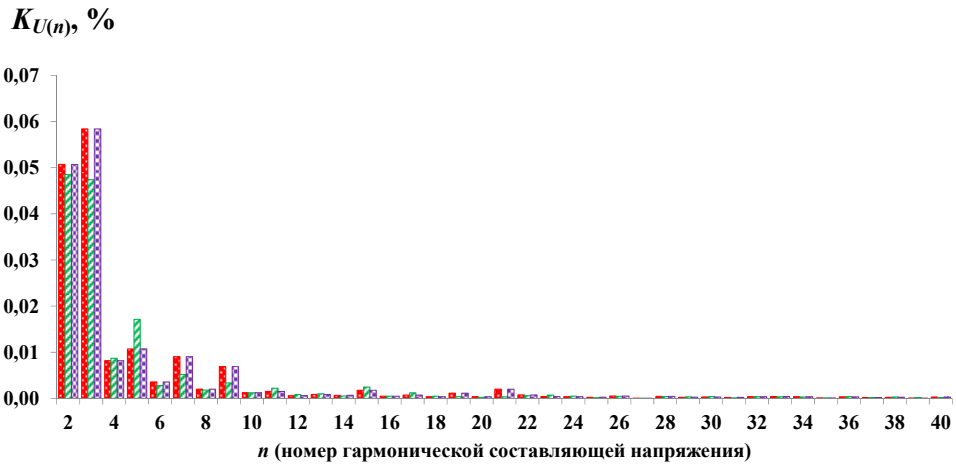


Рис. 4. Коэффициенты *n*-х гармонических составляющих напряжения при работе светильников серии ЛПП, ФПО и ЛПО с ЭПРА:
– серия ЛПП; – серия ФПО; – серия ЛПО

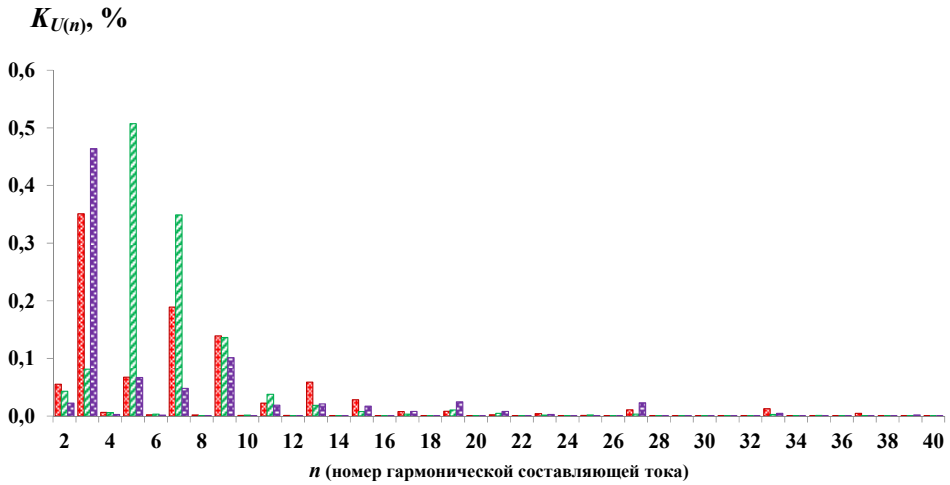


Рис. 5. Коэффициенты *n*-х гармонических составляющих тока при работе светильников серии ЛПП, ФПО и ЛПО с ЭПРА: – серия ЛПП; – серия ФПО; – серия ЛПО

Значения коэффициентов *n*-х гармонических составляющих напряжения при работе исследуемых одиночных светильников были незначительны и не превышали норм, установленных ГОСТ 32144-2013 [1], однако были и четных порядков. Значения коэффициентов *n*-х гармонических составляющих тока также были незначительны и не превышали норм, установленных ГОСТ 30804.3.2-2013 [2], и также были четных порядков. Однако при массовом включении таких электроприемников степень искажение форм тока и напряжения может возрасти.

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения при работе исследуемых одиночных светильников составляет не более 0,8 %. Наибольшее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока пришлось на лампу серии ФПО и составило 0,64 %.

Литература

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ) : ГОСТ 32144-2013. – Минск : Госстандарт, 2015.
2. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний : ГОСТ 30804.3.2-2013. – Минск : Госстандарт, 2016.

ГЕНЕРИРУЮЩИЕ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЖИЛОГО МИКРОРАЙОНА г. ГОМЕЛЯ

И. А. Козлов

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

Научный руководитель С. Г. Жуковец

Энергосистема жилых микрорайонов Гомеля, особенно в зонах новой застройки, сталкивается с проблемой – дефицитом генерирующих мощностей в часы пикового потребления. Насыщение квартир энергоемкой бытовой техникой и увеличение числа электромобилей приводят к тому, что трансформаторные подстанции работают на пределе

своих возможностей. Это создает следующие риски: 1) снижение надежности энергоснабжения. Перегрузка трансформаторов и кабельных линий повышает вероятность аварийных отключений, особенно в вечерние часы; 2) необходимость дорогостоящей модернизации сетевой инфраструктуры. Увеличение мощности подстанций и прокладка новых кабельных линий требуют значительных капитальных вложений, длительных согласований и временного отключения потребителей на период работ; 3) отсутствие резервных источников питания. В случае аварий микрорайоны остаются без электроэнергии на продолжительное время, так как не имеют собственных резервных генерирующих мощностей.

Ключевые слова: комплекс, генерация, электромобиль, Vehicle-to-Grid, V2G.

Практическая реализация

Объект представляет собой пятиэтажное здание общей площадью 5400 м², рассчитанное на 200 автомобилей. Основное инновационное отличие комплекса – внедрение 100 двунаправленных зарядных станций V2G мощностью 30 кВт каждая.

Идея проекта

Парковка превращается в многофункциональный комплекс, где стоянка электромобилей одновременно является распределенной системой генерации, питающей микрорайон.

В основе лежит принцип двунаправленной передачи энергии: аккумуляторы припаркованных электромобилей используются не только для накопления энергии, но и для ее обратной отдачи в сеть в моменты, когда это необходимо для поддержания стабильности энергоснабжения.

Использование специализированной инфраструктуры, поддерживающей технологию V2G – многоуровневой парковки, которая служит физической и технологической платформой для интеграции сотен электромобилей в единую систему управления энергией, превращая их в виртуальную электростанцию.

Процесс генерации энергии от V2G-парковки строится на интеллектуальном управлении доступной емкостью аккумуляторов подключенных электромобилей. При расчетах закладывается использование 50–60 % от общей емкости батареи каждого автомобиля, что обусловлено несколькими факторами:

1. *Сохранение ресурса аккумулятора*. Глубокие разряды негативно сказываются на сроке службы литий-ионных батарей. Ограничение глубины разряда до 50–60 % является щадящим режимом, при котором деградация аккумулятора минимальна и сопоставима с естественным износом при обычной эксплуатации.

2. *Гарантированный запас хода для владельца*. Установленный нижний порог в 40–50 % заряда обеспечивает владельцу достаточный запас энергии для непредвиденных поездок.

3. *Технические ограничения оборудования*. Современные двунаправленные зарядные станции и системы управления батареями оптимизированы для работы именно в этом диапазоне глубин разряда, обеспечивая максимальный КПД преобразования.

При парковке 100 электромобилей со средней емкостью батареи 40 кВт · ч и использовании 50 % доступной емкости (20 кВт · ч с каждого автомобиля) общий доступный энергетический резерв составляет 2000 кВт · ч. При мощности одной V2G-станции 10 кВт одновременная разрядка 50 автомобилей (из расчета 50 % загрузки парковки в пиковый период) позволяет обеспечить отдачу в сеть 500 кВт мощности в течение нескольких часов. Этого достаточно: 1) для снижения нагрузки на трансформаторную подстанцию микрорайона на 10–15 % в вечерний пик;

2) резервного питания нескольких многоквартирных домов или социально значимого объекта (школа, детский сад) в течение 2–4 часов; 3) компенсации кратковременных провалов напряжения и отклонений частоты в сети.

Реализация предложенной V2G-парковки обеспечивает комплексный эффект для энергосистемы микрорайона, городской инфраструктуры и владельцев электромобилей (см. таблицу).

Преимущества проекта

Формирование распределенных генерирующих мощностей без строительства новых электростанций	Аккумуляторы припаркованных электромобилей объединяются в виртуальную электростанцию, которая в часы пик отдает в сеть до 500 кВт мощности. Это позволяет компенсировать дефицит локальной генерации, снизить нагрузку на трансформаторные подстанции и отсрочить или полностью исключить дорогостоящую модернизацию сетевой инфраструктуры
Активное регулирование суточных графиков нагрузки	Система интеллектуально управляет зарядкой и разрядкой: накапливает энергию в периоды низкого потребления и отдает обратно в вечерний пик. Это сглаживает провалы напряжения, предотвращает аварийные перегрузки и повышает устойчивость энергоснабжения всего микрорайона
Создание новых парковочных мест как побочный, но социально значимый эффект	Пятиэтажный комплекс на 200 автомобилей решает острую проблему нехватки организованного хранения транспорта в зонах жилой застройки
Участие в программе «Зеленый доход» и экономическая привлекательность для владельцев	Автовладельцы, предоставляя часть емкости батареи для разрядки в сеть, получают компенсацию – либо снижение тарифа на зарядку, либо прямые платежи

Предложенное решение позволяет трансформировать парковку из пассивного места стоянки в активный, интеллектуальный и экономически выгодный элемент энергосистемы, который одновременно повышает надежность электроснабжения, разгружает сетевую инфраструктуру, создает дополнительные машино-места и дает прямой доход участникам. При минимальных капитальных затратах (по сравнению со строительством новых подстанций) и с использованием уже имеющегося парка электромобилей проект обладает высоким потенциалом масштабирования в жилых микрорайонах Гомеля.

Литература

1. Ахмадеев, А. Р. Влияние электромобилей и зарядных станций на электрические сети / А. Р. Ахмадеев // Энергоэксперт. – 2018. – № 1 (65). – С. 24–28.
2. Сусаренко, М. Ю. Система V2G (Vehicle To Grid) как важнейший элемент интеграции электромобилей в энергетическую систему страны / М. Ю. Сусаренко // Флагман науки. – 2023. – № 8 (8). – С. 383–387.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ CAES-ТЕХНОЛОГИЙ

Д. Ю. Сысоева

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

Научный руководитель А. В. Сычёв

Рассмотрены принципы работы накопителей энергии на сжатом воздухе (CAES), зарубежный опыт их применения и возможности использования таких накопителей в условиях Республики Беларусь для выравнивания графиков электрической нагрузки.

Ключевые слова: CAES-накопитель, сжатый воздух, накопитель энергии, соляная каверна, электропотребление.

В Республике Беларусь поставлена задача повышения эффективности работы энергосистемы, в том числе за счет внедрения систем накопления электроэнергии. Одним из перспективных направлений является использование накопителей энергии на сжатом воздухе или CAES-накопителей (Compressed Air Energy Storage) в соляных кавернах.

Целью работы является ознакомление с системой CAES и ее применением к условиям Солигорского месторождения для последующей оценки влияния данной системы на работу энергосистемы.

Технология CAES основана на следующем принципе: в периоды снижения электрической нагрузки (ночью) избыточная электроэнергия используется для работы компрессоров, которые сжимают воздух и закачивают его в подземное хранилище. В периоды роста нагрузки (днем) сжатый воздух выпускается из хранилища, подогревается и поступает на турбину, которая вращает генератор и вырабатывает электроэнергию.

Таким образом, CAES-система выполняет роль буфера: она поглощает избыточную энергию и отдает ее обратно в часы пиковых нагрузок энергосистемы.

В мире для CAES-систем чаще всего используют соляные каверны – искусственные полости, созданные в соляных пластах методом скважинного выщелачивания, которые достаточно легко создаются: достаточно пробурить скважину и закачивать пресную воду, которая растворяет соль, после чего рассол откачивается на поверхность, а на месте соли образуется полость нужной формы и объема [1].

Глубина залегания соляных пластов от 500 до 800 м является оптимальной для CAES-систем, так как обеспечивает достаточное горное давление для удержания сжатого воздуха.

Солигорское месторождение калийных солей, расположенное на территории Республики Беларусь, является одним из крупнейших в мире. Мощные соляные пласты залегают здесь на глубине от 400 до 1000 м, что идеально подходит для создания каверн под хранение сжатого воздуха. Кроме того, в регионе уже развита промышленная и транспортная инфраструктура, что упрощает возможное строительство CAES-станции.

Возникает закономерный вопрос: почему нельзя использовать уже существующие шахтные выработки ОАО «Беларуськалий». Причина заключается в особенностях их создания. Шахты были пройдены механическими комбайнами и взрывными работами, что привело к образованию микротрещин в окружающей породе. Через эти трещины сжатый воздух будет утекать и герметичность хранилища не будет обеспечена.

Кроме того, шахтные выработки рассчитаны на статические нагрузки, тогда как CAES-система предполагает циклические изменения давления (ежедневные зарядки и разрядки). Это может привести к усталостным разрушениям породы, обрушению кровли и провалам на поверхности. Поэтому для CAES-систем необходимо создавать новые каверны методом выщелачивания, а не использовать старые шахты.

Реализация CAES-проекта в Солигорском районе позволила бы:

– сглаживать суточные пики и провалы в электропотреблении;

– повысить надежность работы энергосистемы;

– более эффективно использовать существующие генерирующие мощности.

Мировой опыт, включая успешно работающие станции в Германии (Хунторф, с 1978 г.), США (Макинтош, с 1991 г.) и современные китайские проекты мощностью до 300 МВт [2], подтверждает техническую осуществимость и экономическую целесообразность CAES-технологий при наличии подходящих геологических условий.

Таким образом, технология CAES является перспективным способом накопления электроэнергии, а Солигорское месторождение обладает необходимыми геологическими условиями для ее реализации в Беларуси. Несмотря на то, что существующие шахты не пригодны для хранения сжатого воздуха, метод скважинного выщелачивания позволяет создавать новые герметичные каверны в соляных пластах [1].

Основные выводы:

– CAES-системы используются в качестве накопителей энергии для выравнивания графиков электрической нагрузки энергосистем, опыт их применения накоплен в Германии, США, КНР;

– Солигорское месторождение обладает необходимыми геологическими условиями для реализации CAES-накопителей в Беларуси, при этом должны создаваться новые герметичные каверны в соляных пластах методом скважинного выщелачивания;

– для реализации проекта создания CAES-накопителей в Беларуси необходимы дополнительные исследования и детальная технико-экономическая оценка такого проекта.

Литература

1. Сжатый воздух и соляные шахты – новое слово в энергетике Китая // Ecosphere.press. – 2025. – URL: https://ecosphere.press/2025/01/15/szhatyj-vozduh-i-solyanye-shahty-novoe-slovo-v-energetike-kitaya/.
2. Китай запускает крупнейший в мире завод по хранению энергии на сжатом воздухе // Habr.com. – 2022. – URL: https://habr.com/ru/companies/first/articles/692740/.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

П. А. Ходыко

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

Научные руководители: Т. В. Алферова, С. Г. Жуковец

Рассмотрено применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для диагностики объектов электроэнергетики в условиях цифровизации энергетической отрасли Республики Беларусь. Показано, что традиционные методы контроля (наземные осмотры, пилотируемая авиация) являются ресурсоемкими и связаны с рисками для персонала. Описаны основные направления использования БПЛА: инспекция линий электропередачи (провода, изо-

ляторы, опоры), мониторинг растительности в охранных зонах, диагностика электрических подстанций с применением тепловизионной диагностики, контроль объектов возобновляемой энергетики (солнечные электростанции, ветрогенераторы), а также выполнение геодезических и картографических работ. Выделены преимущества применения БПЛА: экономическая эффективность, повышение безопасности персонала, оперативность мониторинга и высокая точность диагностики. Сделан вывод, что использование БПЛА повышает эффективность диагностики, снижает затраты на обслуживание и обеспечивает надежность функционирования энергетической инфраструктуры.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, диагностика объектов электроэнергетики, линии электропередачи, тепловизионная диагностика, мониторинг подстанций, безопасность персонала, эффективность мониторинга.

В последние годы энергетическая отрасль Республики Беларусь активно развивается под влиянием цифровизации, автоматизации и внедрения современных технологий мониторинга [1]. Увеличение протяженности линий электропередачи, рост числа подстанций, распределительных устройств и других объектов энергетической инфраструктуры требует повышения надежности и безопасности их эксплуатации. Сбои в работе энергетических систем могут приводить к серьезным экономическим и социальным последствиям, что обусловливает необходимость регулярного контроля состояния оборудования.

Значительная часть энергетических объектов расположена в труднодоступных районах, что существенно усложняет их обследование. Традиционные методы контроля, такие как наземные осмотры и использование пилотируемой авиации, являются ресурсоемкими, требуют значительных затрат времени и финансов, а также связаны с рисками для персонала [5]. В этих условиях применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится эффективным инструментом, позволяющим повысить качество мониторинга и диагностики энергетической инфраструктуры.

Беспилотные летательные аппараты представляют собой перспективное средство контроля состояния энергетических объектов. Современные беспилотные системы оснащаются камерами высокого разрешения, тепловизионными и мультиспектральными датчиками, а также лазерными сканерами. Это позволяет получать детализированные изображения и точные данные о состоянии оборудования и окружающей среды. Использование беспилотных аппаратов значительно сокращает время проведения инспекций, снижает затраты и повышает безопасность выполнения работ.

Одним из основных направлений применения БПЛА является инспекция линий электропередачи. Эти объекты имеют значительную протяженность и проходят через различные природные зоны, что делает их регулярное обследование сложной задачей. С помощью беспилотных аппаратов осуществляется детальный контроль состояния проводов и изоляторов. Высокоточные камеры позволяют выявлять трещины, коррозию, механические повреждения и следы износа [3, 7].

Особое внимание уделяется состоянию изоляторов, поскольку их повреждение может привести к коротким замыканиям и нарушению работы энергосистемы [7].

Кроме того, БПЛА применяются для контроля состояния опор линий электропередачи. Опоры являются важнейшими конструктивными элементами, и их повреждение может привести к серьезным авариям. С помощью беспилотников можно выявлять трещины, деформации и другие повреждения, а также оценивать состояние креплений и соединений. Это позволяет своевременно выявлять потенциально опасные участки и принимать меры по их устранению.

Дополнительным направлением является мониторинг растительности в охранных зонах линий электропередачи. Разрастание деревьев и кустарников вблизи проводов создает риск коротких замыканий и повреждения линий. Использование БПЛА позволяет оперативно выявлять участки, где растительность приближается к проводам на опасное расстояние, что обеспечивает своевременное проведение работ по расчистке.

Важную роль играет применение БПЛА при диагностике электрических подстанций. Подстанции являются ключевыми элементами энергетической системы, обеспечивающими преобразование и распределение электроэнергии. Беспилотные аппараты позволяют проводить регулярный осмотр трансформаторов, распределительных устройств и коммутационной аппаратуры. В процессе обследования выявляются механические повреждения, коррозия, деформации и дефекты изоляции, которые могут привести к отказам оборудования [4].

Особое значение имеет тепловизионная диагностика. Тепловизионные камеры позволяют фиксировать распределение температуры на поверхности оборудования и выявлять участки с аномальным нагревом. Повышенная температура может свидетельствовать о перегрузках, ухудшении контактов или повреждении изоляции. С помощью тепловизионных систем можно выявлять неисправные электрические соединения и перегрев отдельных элементов, что позволяет предотвращать аварийные ситуации и продлевать срок службы оборудования [4].

Беспилотные летательные аппараты также широко применяются для контроля объектов возобновляемой энергетики. При обследовании солнечных электростанций выявляются загрязнения и повреждения панелей, которые могут снижать их эффективность.

Даже незначительные дефекты оказывают влияние на производительность, поэтому регулярный контроль имеет важное значение. В ветроэнергетике беспилотные аппараты используются для диагностики лопастей ветрогенераторов, позволяя обнаруживать трещины, деформации и другие повреждения без проведения опасных высотных работ. Также осуществляется контроль состояния башен и других конструктивных элементов.

Дополнительным направлением применения БПЛА является выполнение геодезических и картографических работ. С их помощью проводится аэрофотосъемка территории, создаются топографические карты и трехмерные модели местности. Эти данные используются при проектировании новых энергетических объектов, выборе оптимальных маршрутов линий электропередачи и анализе условий размещения инфраструктуры.

Использование беспилотных технологий значительно ускоряет процесс сбора информации и повышает точность получаемых данных.

Применение БПЛА в энергетической отрасли обладает рядом существенных преимуществ. Прежде всего, это экономическая эффективность, поскольку снижаются затраты на проведение инспекций и уменьшается потребность в использовании дорогостоящей техники, включая вертолеты. Один беспилотный аппарат способен выполнять задачи, которые ранее требовали привлечения нескольких специалистов [2].

Также значительно повышается безопасность персонала, так как исключается необходимость выполнения работ в опасных условиях, включая высотные и труднодоступные участки. Это снижает риск травматизма и повышает общую эффективность организации работ.

Кроме того, обеспечивается высокая оперативность мониторинга. Беспилотные летательные аппараты позволяют быстро обследовать протяженные участки линий электропередачи и другие объекты инфраструктуры, что особенно важно для удаленных районов. Полученные данные позволяют оперативно реагировать на выявленные дефекты и планировать профилактические работы.

Высокая точность диагностики является еще одним важным преимуществом. Современные датчики позволяют выявлять даже незначительные повреждения, которые невозможно обнаружить при традиционных методах осмотра. Это обеспечивает возможность раннего выявления дефектов и предотвращения аварий.

Таким образом, использование БПЛА является важным направлением развития энергетической отрасли. Их применение позволяет повысить эффективность диагностики, снизить затраты на обслуживание, обеспечить безопасность персонала и повысить надежность функционирования энергетической инфраструктуры.

Литература

1. Министерство энергетики Республики Беларусь. Официальный сайт. – URL: https://minenergo.gov.by (дата обращения: 10.03.2026).
2. Министерство энергетики Российской Федерации. Официальный сайт. – URL: https://minenergo.gov.ru (дата обращения: 10.03.2026).
3. Россети. Применение беспилотных летательных аппаратов для диагностики линий электропередачи. – URL: https://www.rosseti.ru (дата обращения: 10.03.2026).
4. Белэнерго. Цифровизация энергетики и применение современных технологий диагностики. – URL: https://www.belenergo.by (дата обращения: 10.03.2026).
5. Кузнецов, С. В. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга энергетической инфраструктуры / С. В. Кузнецов, А. Н. Григорьев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 5. – С. 420–430.
6. Сытник, В. И. Беспилотные летательные аппараты в геодезии и картографии / В. И. Сытник. – М. : Инфра-Инженерия, 2021. – 256 с.
7. Шабалин, А. С. Применение беспилотных технологий для диагностики линий электропередачи / А. С. Шабалин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 3. – С. 45–52.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ

В. А. Марков

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

Научный руководитель А. А. Капанский

Исследуется эффективность применения медианной фильтрации для очистки телеметрических сигналов от помех, полученных с повысительной насосной станции г. Гомеля. Проводится сравнительный анализ работы фильтра с различными размерами окна, оценивая качество подавления шумов. Полученные результаты обосновывают необходимость баланса между чистыми данными и сохранением информативности сигнала в системах мониторинга городской инфраструктуры.

Ключевые слова: медианная фильтрация, телеметрический сигнал, импульсные помехи, фильтрация данных, размер окна фильтра.

В современном мире чистые данные без шумов играют ключевую роль в обеспечении безопасности жизнедеятельности человечества. С развитием социальной инфраструктуры количество получаемых данных не только увеличивается, но и ус-

ложняется, что приводит к увеличению риска аварийных ситуаций, без должной фильтрации данных, из-за различных шумов, которые в результате эксплуатации различных приборов могут появиться. Аварии могут иметь серьезные последствия из-за появления большого количества одинаковых помех в данных, которые человеку вручную сложно оценить, делая вопросы надежности и бесперебойности систем фильтрации данных особенно актуальными.

Целью данного исследования является проверка использования медианного фильтра для устранения импульсных помех в потоках данных мониторинговых систем, а также определение оптимальных параметров фильтра для обеспечения максимальной точности при сохранении полезного сигнала.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

1. Исследовать методы фильтрации и детальный разбор алгоритма медианной фильтрации.

2. Определить влияние медианного окна на качество подавления шумов и оценить эффективность работы фильтра путем сравнения графических и цифровых показателей исходного и отфильтрованного сигналов.

В качестве объекта исследования рассмотрена повысительная насосная станция (ПНС) системы централизованного водоснабжения города Гомеля, расположенная по адресу: ул. Бориса Царикова, 55.

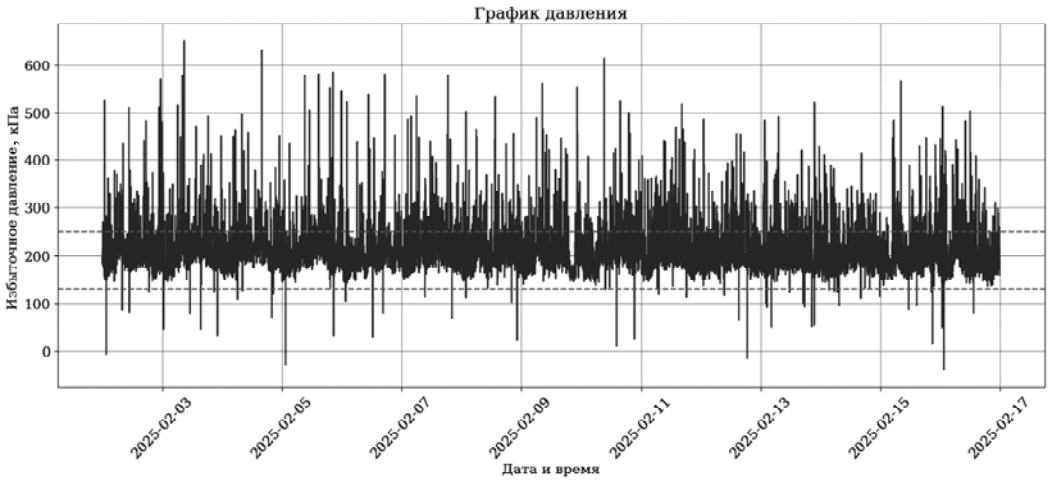


Рис. 1. График исходных данных:
---- – минимальное значение 130; ---- – максимальное значение 250

На рис. 1 представлен график исходных данных с множество шумами. Данные получены с ПНС, которые были записаны на протяжении двух недель и их запись происходила ежеминутно. Объем данных составил 21484 из них 1171 (5,45 %) составили шумы, которые выходили за пределы 130–250 кПа.

Медианный фильтр представляет собой оконный фильтр, последовательно скользящий по массиву сигнала и возвращающий на каждом шаге один из элементов, попавших в окно фильтра. Выходной сигнал y_k скользящего медианного фильтра шириной $2n + 1$ для текущего отсчета k формируется из входного временного ряда ..., x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, ... в соответствии с формулой [1]:

$$y_k = med(x_{k-n},\ x_{k-n+1},\ ...,\ x_{k-1},\ x_k,\ x_{k+1},\ ...,x_{k+n-1},\ x_{k+n}),$$

где $med(x_1,...,x_m,...,x_{2n+1}) = x_{n+1}, x_m$ – элементы вариационного ряда, т. е. ранжированные в порядке возрастания значений;

$$x_m : x_1 = \min(x_1, x_2, ..., x_{2n+1}) \le x_{(2)} \le x_{(3)} \le ... \le x_{2n+1} = \max(x_1, x_2, ..., x_{2n+1}).$$

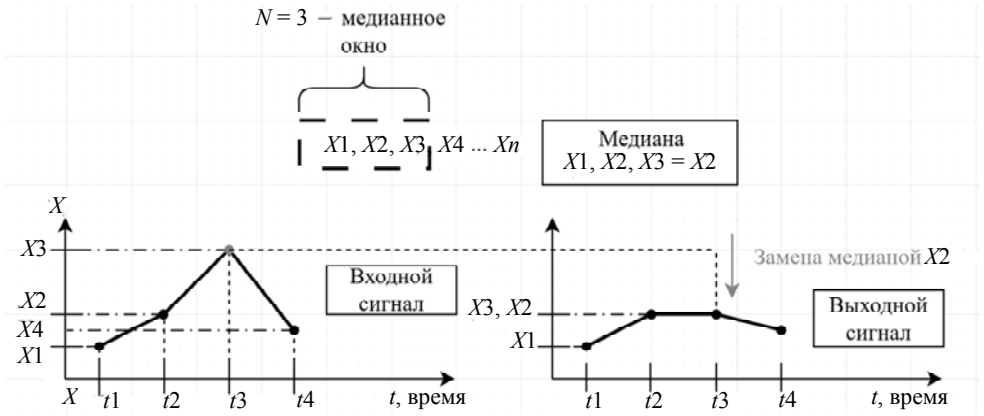


Рис. 2. Принцип действия медианной фильтрации

Таким образом, медианная фильтрация осуществляет замену значений отсчетов в центре окна медианным значением исходных отсчетов внутри окна фильтра.

Рис. 3. График после фильтрации медианой с размером окна 3:
—— – после медианной фильтрации (окно 3); ---- – минимальное значение 130; ---- – максимальное значение 250

Был использован размер окна фильтра 3, после фильтрации данным окном у нас получились следующие значения: средняя абсолютная погрешность (MAE) 5,24 %. Можно отметить, что количество шумов после фильтрации уменьшилось до 184 (0,86 %), доля снижение шума составила 84,22 %. Для окна размером 11 средняя абсолютная погрешность (MAE) 7,39 %. Количество шумов после фильтрации – 0, доля снижения шума составила 100,00 %:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|y_i - \hat{y}_i\right|,$$

где n – общее количество измерений (точек данных); y_i – истинное (эталонное) значение в i-й точке; $\hat{y}_i$ – полученное значение (после фильтрации или измерений); $\left|y_i - \hat{y}_i\right|$ – модуль разности (абсолютное отклонение).

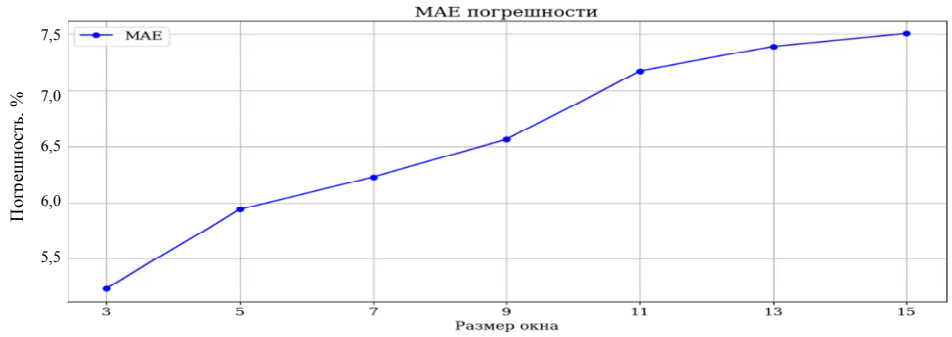


Рис. 4. График погрешности

На графике видно, что с увеличением размера интервального окна фильтра количество шумов уменьшается, однако средняя абсолютная погрешность возрастает и происходит размытие крутых изменений сигнала и скачков, что может привести к аварии, которую мы не сможем увидеть.

Дальнейшая задача исследований: использовать данные с целью получения оптимального соотношения окна фильтра для предотвращения аварий.

Литература

1. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т. С. Хуанг [и др.]. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.

ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ К ЗНАЧЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИБОРОМ РЕСУРС-UF2

И. М. Гончаров

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

Научный руководитель О. Г. Широков

Представлено влияние прерываний напряжения при отсутствии маркирования результатов измерений на измерение значений показателей несимметрии и несинусоидальности напряжения. Показано, что при этом измеренные значения показателей несимметрии и несинусоидальности напряжения могут быть недостоверными и значительно превышать установленные требования нормативно-технических документов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, маркированные данные, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

Одной из задач приборного контроля качества электроэнергии (КЭ) является оценка соответствия фактических значений показателей качества электрической энергии на границах раздела принадлежности сетей по признаку собственности или владения значениям, установленным в договорах на пользование электроэнергией и (или) ГОСТ 32144-2013 [1]. Этот нормативно-технический документ применяется при установлении и нормировании показателей КЭ, относящихся к частоте, значениям и форме напряжения, а также к симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения, но не нормирует характеристики провалов и прерываний напряжения, перенапряжения и импульсных напряжений. На рис. 1 представлена гистограмма результата измерения значений коэффициента восьмой гармонической составляющей напряжения $K_{U(8)}$, иллюстрирующая выход этого показателя КЭ за нормируемое значение.

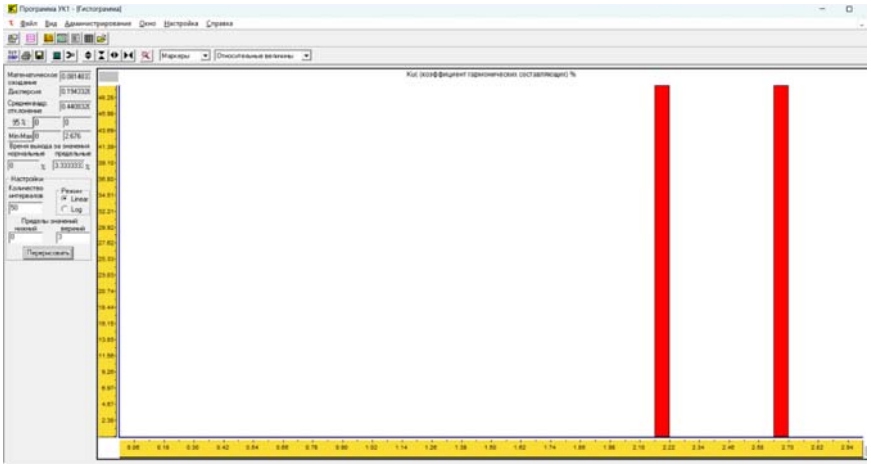


Рис. 1. Гистограмма изменения значений коэффициента восьмой гармонической составляющей напряжения $K_{U(8)}$

На рис. 2 и 3 представлены графики изменения значений соответствующих показателей КЭ совместно с графиками кратковременных глубоких провалов напряжения (практически прерываний). Из графиков видно, что превышение, а случае коэффициентов четвертой $K_{U(4)}$, восьмой $K_{U(8)}$, сороковой $K_{U(40)}$ гармонических составляющих напряжения сам факт возникновения, связаны с происходящими в процессе измерения глубокими провалами напряжения. Это свидетельствует о том, что алгоритм применяемого средства измерения не позволяет избежать одновременного учета провала напряжения и измерения показателей КЭ. Для и избегания таких случаев ГОСТ 30804.4.30-2013 [2] предписывает выполнять маркирование данных при проведении измерений с характеристиками процесса измерения классов *A* и *S* показа-телей КЭ относящихся к частоте, значениям и форме напряжения, а также к симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения, а ГОСТ 32144-2013 [1] предписывает при измерения указанных показателей КЭ не учитывать маркированные данные.

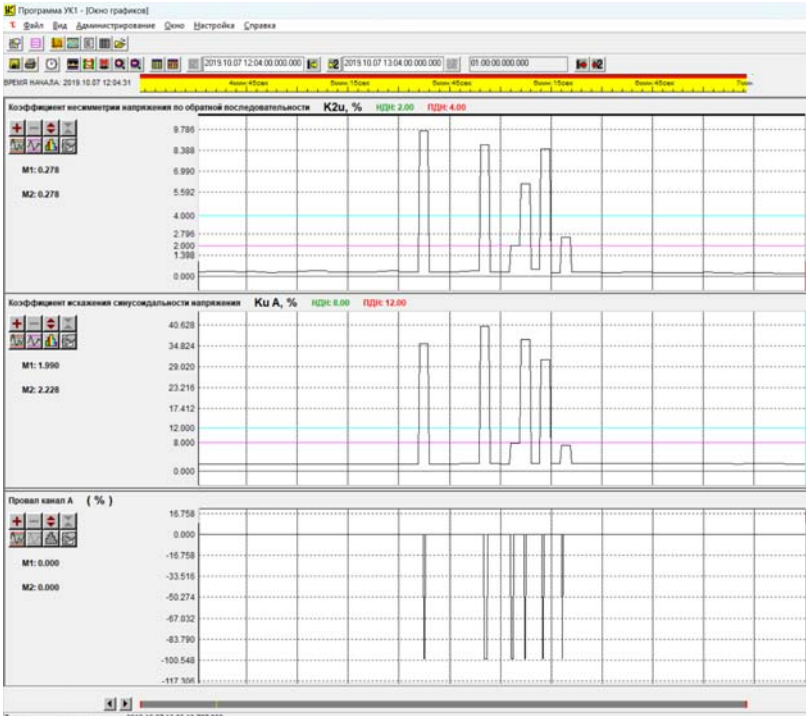


Рис. 2. Графики изменения значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}, суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения по фазе *A* K_UA, график провалов напряжения в фазе *A*

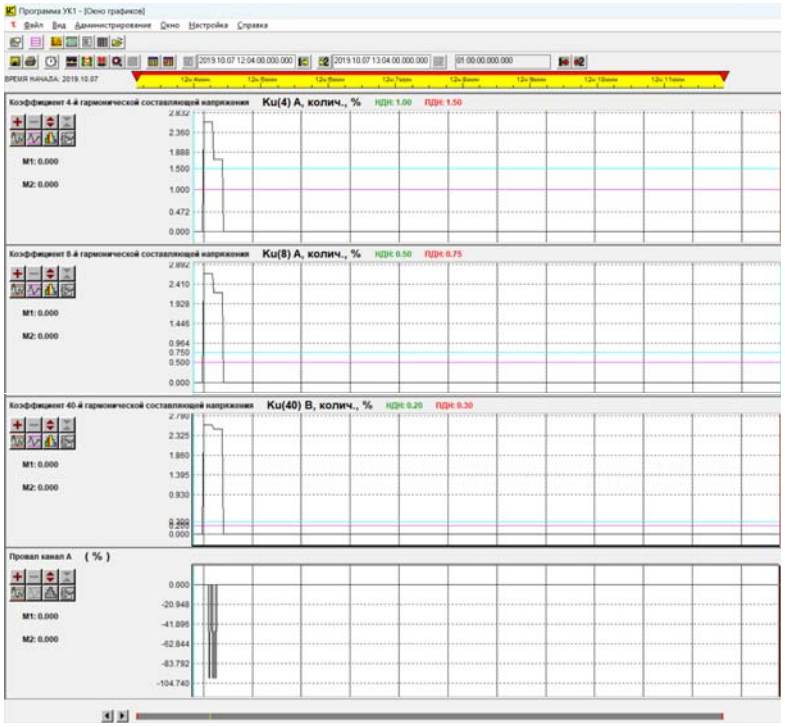


Рис. 3. Графики изменения значений коэффициентов четвертой гармонической составляющей напряжения $K_{U(4)}$, восьмой гармонической составляющей напряжения $K_{U(8)}$, сороковой гармонической составляющей напряжения $K_{U(40)}$, график провалов напряжения в фазе *A*

Проведение измерений показателей КЭ относящихся к частоте, значениям и форме напряжения, а также к симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения прибором Ресурс-UF2 позволяет не учитывать маркированные данные при возникновении в процессе измерения провалов напряжения, перенапряжений и прерываний напряжения, что позволяет избежать недостоверности результата измерений по этим причинам.

Литература

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ) : ГОСТ 32144-2013. – Минск : Госстандарт, 2015.
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии : ГОСТ 30804.4.30-2013. – Минск : Госстандарт, 2014.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАТФОРМЫ nanoCAD ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

А. А. Савицкий

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

Научный руководитель А. В. Сычёв

Проведен анализ функциональных возможностей программной платформы nanoCAD в контексте проектирования схем электрических сетей. Особое внимание уделено механизмам формирования пользовательских библиотек условных графических обозначений, соответствующих корпоративным стандартам, а также вопросам автоматизации преобразования схем, полученных в сторонних программных комплексах, в формат, совместимый с nanoCAD. Рассмотрены перспективы расширения предложенного подхода для решения задачи формирования схем электрических сетей на основе CIM-моделей электроэнергетических систем. Представлены результаты разработки программы, обеспечивающей автоматизированную генерацию схем на основе исходных данных из стороннего приложения.

Ключевые слова: nanoCAD, схема электрической сети, графический формат файла, пиксельная графика, векторная графика, цифровая модель электрической сети.

В условиях цифровой трансформации электроэнергетической отрасли возрастает значимость обеспечения согласованности данных, используемых на различных этапах жизненного цикла объектов электрических сетей. В частности, возникает необходимость интеграции между собой расчетных и проектных программных комплексов, что требует разработки унифицированных подходов к преобразованию данных между различными такими комплексами.

Цель работы: исследование и оценка функциональных возможностей программной платформы *nanoCAD* [1] для проектирования схем электрических сетей, а также разработка и апробация подхода к автоматизированному преобразованию исходных данных из сторонних программных комплексов в формат, соответствующий требованиям систем автоматизированного проектирования и стандартов Республики Беларусь, с последующей оценкой перспектив применения данного подхода для интеграции с цифровой общей информационной моделью или *CIM*-моделью (*Common information model*) электроэнергетических систем [2].

Функционал *nanoCAD* обеспечивает возможность формирования блоков, содержащих как графическое представление элемента, так и набор атрибутивных параметров, характеризующих его свойства. Это позволяет реализовать универсальный подход к описанию объектов электрической сети с помощью условных графических обозначений (УГО). *NanoCAD* изначально содержит библиотеку УГО элементов схем согласно межгосударственным и Российским стандартам, например, [3]. Однако, не все УГО *nanoCAD* соответствуют обозначениям, установленными стандартами Республики Беларусь [4].

Платформа *nanoCAD* позволяет создать собственные УГО элементов электрических сетей и схем в соответствии со стандартами Республики Беларусь, а, используя панель «Инструменты», структурировать их по группам и разделам библиотеки УГО, в дальнейшем вставляя в документ с возможностью настройки масштаба и единиц измерения. Механизм работы функциональной панели «Инструменты» следующий: пользователь формирует УГО элемента схемы под заданный стандарт, добавляя к нему необходимую атрибутивную информацию, после чего сохраняет в виде блока. Блок УГО внедряется в панель «Инструменты». После сохранения пользователь сможет вставлять УГО элемента по нажатию одной кнопки. В *nanoCAD* предусмотрена функция экспорта/импорта таких библиотек УГО элементов в файл с расширением *XTP*, что обеспечивает возможность передачи библиотек УГО на другие компьютеры или коллегам. Все эти функции позволяют ускорить работу пользователя, унифицировать готовый результат, а также настроить и адаптировать *nanoCAD* для работы с разными проектами и стандартами [1].

Системы автоматизированного проектирования, к числу которых относится *nanoCAD*, традиционно используются для формирования графической части проектной документации. Однако их потенциал существенно расширяется при внедрении механизмов автоматизации, позволяющих использовать результаты расчетов, полученные в специализированных программных продуктах, например, в программе *LineCapacity*, разработанной в ГГТУ им. П. О. Сухого по заданию РУП «Гомельэнерго» для анализа пропускной способности сельских электрических сетей. Программа предназначена для анализа нагрузочной способности низковольтных электрических сетей, питающих бытовых одно- и трехфазных потребителей, и формирует схемы их подключения к электрической сети, используя пиксельную графику [5]. В программе отсутствует возможность сохранения схемы в графическом формате файла и ее вывод на печать.

В целях обеспечения возможности конвертации схем из формата программы *LineCapacity* в *DWG*-формат и, как следствие, использование возможностей работы с этими схемами в CAD-системах, в том числе и *nanoCAD* (редактирование, вывод на печать и др.), разработан алгоритм преобразования файла исходных данных из *LineCapacity* в *DXF*-формат с последующей интеграцией в *nanoCAD* и сохранением в *DWG*-формате в соответствии с требованиями [4]. Он включает анализ данных, сопоставление элементов с УГО, генерацию схемы и внедрение ее атрибутивных данных в УГО. На основе этого алгоритма была разработана программа-корвертор для преобразования схем в пиксельной графике программы *LineCapacity* в векторную графику формата *DXF*, что обеспечивает совместимость с CAD-системами и *DWG*-форматом. Программа разработана на языке *Python* и способна работать как плагин в *nanoCAD*, так и отдельно создавать *DXF*-файлы со схемами электрических сетей на баз заранее подготовленных УГО элементов таких схем.

В настоящее время в энергосистеме Республики Беларусь для обеспечения интеграции и совместимости разнородных программных продуктов внедряется концепция

создания универсальной информационной модели и единого подхода к обмену данными, основой которой является стандарт СТП 33240.01.108-22 «Определение единой информационной модели электрической сети в сочетании с единой системой идентификации объектов модели и единой системой управления нормативно-справочной информацией». Применение [2] позволит обеспечить совместимость компьютерных программ, разрабатываемых для автоматизации информационного обмена в электроэнергетике, с информационными продуктами, поддерживающими обмен данными в *CIM*-формате, повысить надежность моделирования, а также снизить затраты на разработку интерфейсов между программным обеспечением. *CIM*-формат содержит описание субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок, входящих в их состав оборудования, устройств, их связей, свойств и иных понятий в соответствии с профилем информационной модели [2].

Дальнейшая задача исследований: развитие программы-конвертора с целью адаптации для работы с *CIM*-форматом, что позволит обеспечить интеграцию различных программных комплексов и создать единую цифровую среду проектирования.

Таким образом, проведен анализ программы *nanoCAD* и установлена возможность адаптации ее библиотек УГО под стандарты Республики Беларусь через панель «Инструменты». Разработаны алгоритм и программа на языке *Python* для конвертации пиксельных схем из *LineCapacity* в векторный *DXF* с последующим формированием *DWG* в *nanoCAD*. Это позволяет автоматизировать перенос данных, исключить ручную перерисовку и обеспечить совместимость с требованиями стандартов Республики Беларусь. Дальнейшая перспектива развития программы включает ее адаптацию для импорта и работы с *CIM*-моделями, а также генерацию интеллектуальных схем в *DWG*-формат согласно [2].

Литература

1. Полещук, Н. Н. Путь к nanoCAD / Н. Н. Полещук. – СПб. : БХВ-Петербург, 2017. – 365 с.
2. Определение единой информационной модели электрической сети в сочетании с единой системой идентификации объектов модели и единой системой управления нормативно-справочной информацией : СТП 33240.01.108-22. – Минск : Белэнерго, 2025. – 27 с.
3. Оперативно-диспетчерское управление. Нормальные схемы электрических соединений объектов электроэнергетики : ГОСТ 56303-2014. – М. : Стандартинформ 2014. – С. 16.
4. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике. Разработка нормальных схем электрической сети и нормальных схем электрических соединений энергообъектов : СТП 33243.20.524-25. – Минск : Белэнерго 2025. – 74 с.
5. Автоматизация расчета режима низковольтной электрической сети / Д. И. Зализный, Ю. А. Рудченко, Д. И. Веремеева, Д. В. Сучков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1 (100). – С. 104–115.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭФФЕКТИВНОЙ СИНЕЙ ОСВЕЩЕННОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Н. В. Ляховец

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

Научные руководители: Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко

Представлен анализ эффективной синей освещенности источников света на примере современных светодиодных ламп. Рассмотрена методика измерения основных светотехнических характеристик, позволяющая объективно оценить спектральный состав излучения.

На основе экспериментальных данных проведена оценка мощности синих пиков в исследуемых образцах и выполнено их сравнение.

Ключевые слова: светодиодные лампы, эффективная синяя освещенность, спектральный состав излучения, светотехнические измерения.

Взвешенная энергетическая освещенность синего света используется для оценки фотобиологической опасности синего света (Blue Light Hazard – BLH) для сетчатки глаза. Она позволяет количественно измерить насколько опасен свет источника (LED, лампа) с точки зрения риска вызвать фотохимическое повреждение сетчатки (макулодистрофию) при длительном воздействии. Оценка фотобиологической опасности синего света (диапазон 400–500 нм) проводится специализированными аккредитованными лабораториями в соответствии с международным стандартом IEC 62471 (или ГОСТ Р МЭК 62471). Испытания включают измерение спектральной яркости и оценку риска фотохимического повреждения сетчатки, а также присваивает классы риска от 0 (безопасно) до 3 (высокий риск).

Предельно допустимая концентрация синего света, представляющего опасность для сетчатки глаза, составляет 1 000 000 Дж/м²/ср. Например, для группы риска 0 требуется яркость < 100 Вт/м^2/ср, при этом соответствующее время воздействия не должно превышать 10 000 секунд; для группы риска 1 – яркость < 10 000 Вт/м^2/ср, при этом соответствующее время воздействия не должно превышать 100 секунд; а для группы риска 2 – яркость < 4 000 000 Вт/м²/ср, при этом соответствующее время воздействия не должно превышать 0,25 секунды. Для небольших источников света предел составляет 100 Дж/м^2, что, как правило, относится к светодиодным источникам света.

Фотобиологическая безопасность регламентируется стандартами, такими как ГОСТ IEC 62471-2013, устанавливающими предельные уровни облучения глаз и кожи для предотвращения фотохимических и термических повреждений (УФ, видимый свет, ИК-излучение). Значения зависят от длины волны, времени воздействия (от 0,01 мс до 8 ч) и структуры источника (точечный/протяженный).

Предельно допустимая концентрация синего, представляющая опасность для глаз, должна составлять < 100 Дж/м^2. Например, для группы риска 0 требуемая интенсивность излучения составляет < 0,01 Вт/м^2, при этом соответствующее время воздействия не превышает 10 000 с; для группы риска 1 требуемая интенсивность излучения составляет 1 Вт/м^2, при этом соответствующее время воздействия не превышает 100 с; а для группы риска 2 требуемая интенсивность излучения составляет 400 Вт/м^2, при этом соответствующее время воздействия не превышает 0,25 с [1].

Таблица 1

Суммарное значение предельной дозы для кожи и роговицы в соответствии ГОСТ IEC 62471-2013

Наименование опасности	Синий свет от малого источника
Соответствующее уравнение	$E_B = \sum E_\lambda B(\lambda)\Delta\lambda$
Диапазон длин волн, нм	300–700
Длительность воздействия, с	≤ 100 > 100

Окончание табл. 1

Наименование опасности	**Синий свет от малого источника**
Ограничивающая апертура, рад (град)	< 0,011
Предельные дозы при постоянной энергетической освещенности Вт · м$^{-2}$	100/t

Фотобиологическая безопасность, согласно определению, IEC/EN 62471, подразделяется на множество классов, представленных на рис. 1, включая актиническое УФ-излучение кожи и глаз, УФ-излучение типа А для глаз, синее излучение сетчатки, маломощные источники синего света для сетчатки, термическое излучение сетчатки, термическое излучение сетчатки при слабом зрительном воздействии, инфракрасное излучение для глаз и термическое воздействие на кожу и др. В данной работе определялось значение синего света от малого источника излучения.

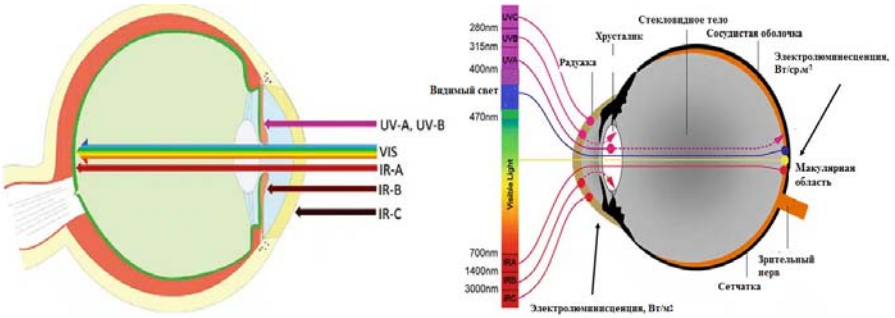


Рис. 1. Фотобиологическая безопасность для различных частей человеческого глаза

Синий свет (400–450 нм) от малых источников (экраны смартфонов, LED-лампы) оказывает негативное влияние, вызывая цифровой зрительный синдром, сухость глаз и раздражение. Длительное воздействие повышает риск повреждения сетчатки, способствуя развитию возрастной макулярной дегенерации, а также может провоцировать катаракту [2–4].

Измерения спектров излучения проводилось с использованием спектрометра – спектрального прибора, состоящего из источника света, одного (двух) монохроматоров и системы регистрации. Регистрация спектра излучения осуществлялась монохроматором, за выходной щелью которого устанавливался фотоумножитель, подключенный к электронной схеме измерения и обработки спектров [5, 6].

В монохроматоре были установлены две дифракционные решетки с 1 200 штрихами на миллиметр, что соответствует диапазону измерения излучения от 400 до 800 нм. Предусмотрен как ручной режим установления длины волны, так и его установка с помощью шагового двигателя и компьютера. За выходной щелью монохроматора помещался фотоумножитель ФЭУ-100. Далее фототок умножителя усиливался усилителем постоянного тока и направлялся на вход аналого-цифрового преобразователя контроллера и далее – в компьютер. Управление движением шагового двигателя осуществлялось контроллером Arduino Uno R3 через транзисторные ключи, выполненные на мощных транзисторах КТ-818. Гальваническая развязка контроллера и транзисторных ключей была осуществлена на оптронах HCPL-817. Разработанная установка позволяет исследовать спектры излучения от 400 до 800 нм.

Для всех измеренных спектров была рассчитана актиничная доза (activation dose) путем перемножения значений энергетической освещенности, измеренных для всех длин волн спектра излучения источника света, на соответствующие тем же длинам волн значения спектральных эффективностей излучения (спектр действие). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения цветовой температуры светодиодных ламп

Наименование источника света	Потребляемая мощность, Вт	Взвешенная энергетическая освещенность синего света, %	Измеренная цветовая температура, К
Лампа накаливания Л40	40	100	2520
Лампа светодиодная Ecola (синий шар)	5	1294	1640
Лампа светодиодная Ecola (красный шар)	5	3,3	5240
Лампа светодиодная Ecola (зеленый шар)	5	152,8	8050
Лампа светодиодная Ecola (желтый шар)	5	57,9	2820
Лампа светодиодная Ecola (белый шар)	7	501,3	3760
Лампа светодиодная Ecola (белый шар iN HOME)	11	632	3730

Результаты измерения показывают, что энергетическая освещенность синего света наименьшая для светодиодной лампы Ecola (красный шар) с потребляемой мощностью 5 Вт. Лампу Ecola (синий шар) с такой же потребляемой мощностью нежелательно применять для освещения жилых помещений.

Литература

1. Фотобиологическая безопасность светодиодных светильников в соответствии со стандартом IEC 62471. – 2026. – URL: https://ru.zgsm-china.com/ (date of access: 20.04.2026).
2. Зак, П. П. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков / П. П. Зак, М. А. Островский // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 4–6.
3. Дюкин, С. LED-мониторы и «синяя опасность» / С. Дюкин // Светотехника. – 2017. – № 5/49. – С. 16–18.
4. Ham, W. T. Retinal sensitivity to damage from sport wavelength light / W. T. Ham, H. A. Mueller // Nature. – 1976. – Vol. 260. – N 5547. – P. 153–155.
5. Савкова, Т. Н. Экспериментальная спектроскопическая установка на базе монохроматора МДР-6 / Т. Н. Савкова, А. М. Яцино, А. И. Кравченко // Естественные науки – базис подготовки специалиста для органов и подразделений по ЧС : материалы III Респ. науч.-практ. конф., Гомель, 1 апр. 2015 г. / ГИИ МЧС Респ. Беларусь, Гомел. фил. Нац. акад. наук Беларуси ; редкол. П. В. Астахов [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 50–56.
6. Получение и свойства люминофорных покрытий на основе наноструктурированного иттрий-алюминиевого граната и легкоплавкого стекла / О. В. Урецкая, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный [и др.] // Тонкие химические технологии. – 2015. – Т. 10, № 3. – С. 85–90.

СЕКЦИЯ IV
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И СВЯЗЬ

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЕКОДИРОВАНИЯ ЭМГ-СИГНАЛОВ В ПРОТЕЗИРОВАНИИ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Я. В. Долгов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Российская Федерация

Научный руководитель Д. Е. Судаков

Рассмотрена проблема ограниченной функциональности современных бионических протезов кисти. Несмотря на то, что миоэлектрические протезы (управляемые мышечными сигналами) стали стандартом в протезировании, они по-прежнему предлагают пользователю лишь базовый набор движений (сжать/разжать), что не позволяет полноценно заменить утраченную конечность. Ключевая идея материала заключается в том, что качественный скачок в этой области возможен благодаря интеграции искусственного интеллекта, а именно – глубоких нейронных сетей. Объяснено, как многоканальные ЭМГ-датчики в паре с обученными нейросетями способны распознавать сложные паттерны мышечной активности. Это позволяет «декодировать» тонкие двигательные намерения человека, такие как отдельные жесты или положение пальцев, а не просто силу сжатия. В итоге использование машинного обучения превращает протез из простого инструмента в более естественное продолжение тела, повышая автономность и качество жизни пациентов. Также в тексте обозначены векторы дальнейших исследований: адаптация алгоритмов для работы на компактных и энергоэффективных процессорах и совершенствование методов сбора биометрических данных.

Ключевые слова: бионическое протезирование, электромиография, нейронные сети, машинное обучение, распознавание паттернов, качество жизни.

Отсутствие кисти, будь то приобретенное в результате травмы или врожденная особенность, значительно осложняет выполнение ежедневных задач и напрямую влияет на степень независимости человека, ухудшая общее качество его жизни. Сегодня в качестве стандартного подхода к функциональному замещению утраченной конечности выступают активные протезы бионического типа, принцип действия которых основан на считывании миоэлектрических сигналов (электромиография – ЭМГ) с сохранившихся мышц предплечья [1]. При всей своей распространенности такие системы обладают рядом серьезных недостатков: невысокая эксплуатационная надежность механики, необходимость регулярной подзарядки аккумуляторов и, что самое существенное, минимальный арсенал доступных движений – в большинстве случаев это лишь возможность сжать или разжать захват. Подобная ограниченность превращает протез в приспособление для простейших действий, но никак не в равноценную замену утраченной руки.

В то время как вопросы автономности питания и механической прочности могут быть со временем решены благодаря совершенствованию компонентной базы (аккумуляторов, двигателей и конструкционных материалов), задача обеспечения интуитивно понятного и точного позиционирования остается открытой. Классические алгоритмы управления, которые устанавливают прямую зависимость между амплитудой мышечного сигнала и усилием или скоростью сжатия, не способны интерпретировать сложные двигательные замыслы человека, задействующие тонкую координацию нескольких пальцев и кистевых суставов [2].

Перспективным способом обойти это ограничение видится внедрение технологий искусственного интеллекта, в особенности – методов глубокого обучения и машинного анализа данных, непосредственно в контур управления протезом. Возможность для этого открывает прогресс в области микроэлектроники, благодаря которому стали доступны компактные носимые многоканальные ЭМГ-датчики высокого разрешения. Подобные устройства позволяют регистрировать объемный спектр сигналов с мышечных групп культи.

Нейросетевые алгоритмы, прошедшие обучение на больших массивах электромиографических данных, учатся выделять характерные пространственно-временные закономерности мышечной активности. Эти паттерны соответствуют не только простейшим, но и более дифференцированным двигательным командам – например, намерению вытянуть указательный палец, выполнить щипковый захват, развести пальцы в стороны или совершить вращение запястья [2]. В процессе настройки под конкретного пользователя алгоритм формирует индивидуализированную и способную к адаптации модель управления.

Использование нейросетей и алгоритмов машинного обучения в управлении бионическими протезами знаменует переход от упрощенного силового контроля к интеллектуальному распознаванию двигательных намерений. Такой подход позволяет устранить главный минус существующих решений – жесткую ограниченность набора движений. Реализация этой концепции открывает путь к созданию протезов следующего поколения, которые воспринимаются не как чужеродный инструмент, а как органичное продолжение тела. Это значительно расширяет функциональные возможности человека, повышает его самостоятельность и в итоге – улучшает качество жизни. Приоритетными направлениями исследований являются совершенствование нейросетевых архитектур для их эффективной работы на бортовых маломощных процессорах, а также развитие методик сбора и искусственного обогащения обучающих выборок ЭМГ-сигналов, в том числе с использованием перспективных методов оценки биомеханических параметров [3].

Литература

1. Micera, S. Control of hand prostheses using peripheral information / S. Micera, J. Carpaneto, S. Raspopovic // IEEE Reviews in Biomedical Engineering. – 2010. – Vol. 3. – P. 48–68.
2. Яцун, С. Ф. Разработка системы управления кистевого протеза с тактильной обратной связью / С. Ф. Яцун, А. В. Мальчиков, А. Н. Рукавицын // Медицинская техника. – 2024. – № 1. – С. 7–9.
3. Method of Topological Skeletonization for Evaluation of Effectiveness of Medical Rehabilitation Based on Upper Limb Exoskeletons / A. Obukhov, A. Potlov, M. Krasnyanskiy [et all.] // Technologies. – 2025. – N 13. – P. 516. – DOI 10.3390/technologies13110516

ПРОТОТИП ТАБЛЕТНИЦЫ ДЛЯ СЛАБОВИДЯЩИХ С ФУНКЦИЕЙ ГОЛОСОВОГО ОПОВЕЩЕНИЯ

Е. П. Евстигнеева, М. А. Любавина, Я. В. Долгов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Российская Федерация

Научный руководитель Т. А. Фролова

Проект предназначен для слабовидящих людей. Устройство напоминает о приеме лекарств утром и вечером с помощью звукового и голосового сигнала. Концептуально значимое преимущество данного устройства состоит в оснащении уникальными тактильно-чувствительными индикаторами, выполненными методом рельефно-точечного шрифта Брайля, что обеспечивает пациентам возможность с абсолютной сенсорной точностью определять пространственное расположение и содержательное наполнение каждой ячейки посредством пальцевой стимуляции поверхности корпуса.

Ключевые слова: устройство, лекарства, будильник, ограниченные возможности, доступность.

Традиционные таблетницы, структурированные по принципу распределения лекарственных средств в соответствии с днями недели и временными интервалами суток, в своей основе ориентированы на зрительное восприятие информации. Данное обстоятельство существенно ограничивает их функциональную применимость для лиц с выраженными нарушениями зрительных функций. Пользователь с частичной или полной утратой зрения не способен достоверно контролировать факт приема медикаментов, а также корректно идентифицировать ячейки, соответствующие конкретным временным промежуткам. Несмотря на потенциальную эффективность тактильных ориентиров, остаются нерешенными задачи, связанные с формированием своевременных напоминаний и контролем последовательности приема препаратов.

В качестве перспективного решения предлагается интеллектуальная таблетница с функцией будильника, разработанная с учетом специфических потребностей слабовидящих и незрячих пользователей.

На рис. 1 представлена структурная схема таблетницы.

Рис. 1. Структурная схема технических средств таблетницы

Данное устройство представляет собой многофункциональную техническую систему [1–5], предназначенную для хранения, точного дозирования и своевременного приема лекарственных препаратов. Конструктивно изделие выполнено в виде корпуса, включающего три обособленные функциональные зоны, две из которых содержат по двенадцать индивидуальных отсеков, соотнесенных с определенными временными интервалами суточного цикла. Функциональные возможности устройства расширены за счет встроенного таймера, реализующего алгоритм работы, аналогичный классическому будильнику, с возможностью ручной настройки параметров срабатывания звукового сигнала. Разработанная 3D-модель таблетницы показана на рис. 2.

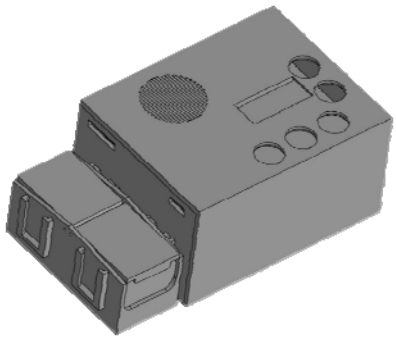


Рис. 2. 3D-модель таблетницы

Каждое отделение оснащено рельефно-точечными обозначениями, выполненными в соответствии с системой шрифта Брайля, что позволяет пользователю осуществлять точную идентификацию ячеек посредством осязания.

Одним из этапа реализации было составление спецификации (см. таблицу) на узлы и элементы таблетницы в соответствии со структурной схемой. Схема подключения (рис. 3) используется для указания принципов соединения различных электрических или электронных блоков в единую систему.

Спецификация узлов и элементов

Количество	**Название элемента**
1	Динамик 8 Ом, 2 Вт
1	Плата Arduino nano
1	SD модуль Arduino
1	Экран Arduino 0.91 Oled
5	5_1 – кнопка «Up», 5_2 – кнопка «Stop», 5_3 – кнопка «Apply», 5_4 – кнопка «Mode», 5_5 – кнопка «Down»
1	Повышающий преобразователь
1	Аккумулятор Li-on формата 18650
1	Модуль зарядки Arduino
1	Конденсатор
1	Резистор 1 кОм
1	Резистор 150 Ом
1	Транзистор N-P-N

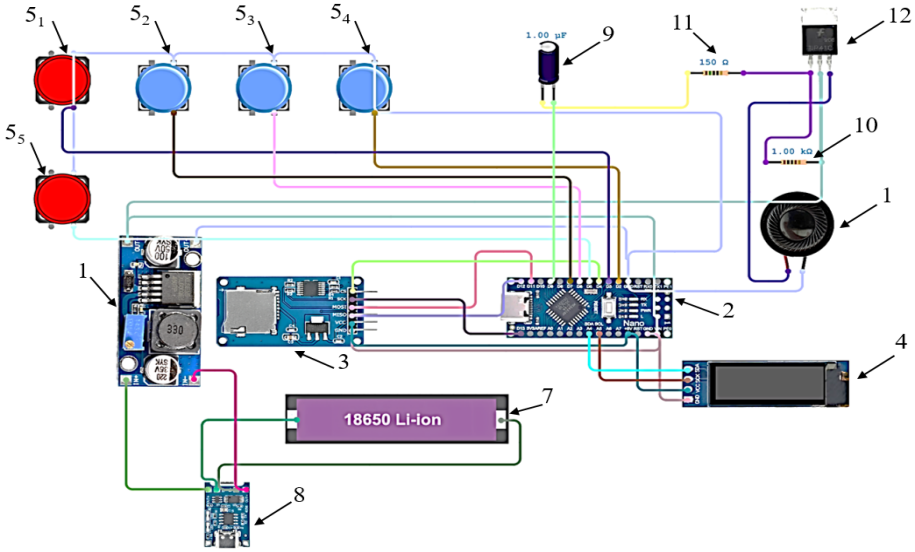


Рис. 3. Схема подключения

Дополнительно устройство оснащено встроенным электронным модулем оповещения, функционирующим по принципу программируемого таймера. Акустическая система генерирует звуковые сигналы в заранее заданные временные интервалы, соответствующие графику приема лекарств.

Новизна данного решения заключается в комплексной интеграции тактильных и аудиальных интерфейсов в рамках единого устройства, ориентированного на пользователей с сенсорными ограничениями. В отличие от существующих аналогов разработанный прототип обеспечивает не только напоминание, но и когнитивную поддержку процесса приема лекарств. Практическая значимость работы определяется возможностью внедрения устройства в повседневную жизнь людей с нарушениями зрения, что способствует повышению их самостоятельности, снижению зависимости от посторонней помощи и минимизации рисков, связанных с неправильным приемом медикаментов.

Литература

1. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. М. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35–45.
2. Современные тенденции развития рынка медицинских информационных систем / С. В. Фролов, С. Н. Маковеев, С. В. Семенова, С. Г. Фареа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 266–272.
3. Фролов, С. В. Совместное использование методов функциональной диагностики и математического моделирования сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным пороком сердца / С. В. Фролов, Д. Е. Судаков // Российский кардиологический журнал. – 2024. – № 29 (17). – С. 44.
4. Lenshin, S. G. Device for the analysis of the psycho-emotional state of man's brain activity / S. G. Lenshin, D. E. Sudakov // The World of Science without Borders : материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Тамбов, 15 февр. 2019 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2019. – P. 62–64. – EDN ZDFFXV.
5. Семенов, Д. Д. Проблемы автоматизации сбора и обработки медицинской статистической информации / Д. Д. Семенов, Д. Е. Судаков // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 15–17 нояб. 2017 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2017. – Вып. 4, т. III. – С. 174–177. – EDN XQIVWP.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИМ ОБЪЕКТОМ НА БАЗЕ SCADA-СИСТЕМЫ

М. А. Макаровский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», Российская Федерация

Научный руководитель А. Н. Швецов

Рассмотрена модернизация неавтоматизированной газовой котельной в Вологде путем внедрения SCADA-системы. Показано, что создание системы сбора, визуализации и архивирования данных является первым и необходимым шагом для перехода от ручного управления к цифровым методам контроля. Разработана трехуровневая SCADA-система на базе отечественного программируемого логического контроллера ОВЕН и программного комплекса MasterSCADA 4D. Система обеспечивает централизованный мониторинг ключевых параметров: температуры, давления, расхода, уровня и состояния оборудования. Реализован удобный человеко-машинный интерфейс с мнемосхемами, цветовой и звуковой сигнализацией отклонений. Внедрение SCADA-системы позволило повысить ситуационную осведомленность персонала, сократить время реагирования на нештатные ситуации и создать цифровую историю работы объекта. Полученные результаты создают основу для дальнейшего внедрения интеллектуальных методов анализа.

Ключевые слова: SCADA, визуализация, человеко-машинный интерфейс, протокол Modbus, мнемосхема, программируемый логический контроллер.

Цифровая трансформация энергетического сектора требует перехода от ручного управления и простейшей автоматизации к интеллектуальным, адаптивным системам. Эта задача особенно актуальна при модернизации небольших и средних распределенных тепловых объектов, многие из которых до сих пор работают в ручном режиме [1]. Отсутствие систематического сбора телеметрических данных является ключевым барьером для внедрения современных методов анализа и оптимизации.

В данном исследовании в качестве объекта модернизации рассматривается существующая неавтоматизированная газовая котельная в Вологде. Первым и обязательным шагом является создание системы сбора данных, визуализации и архивирования – SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition). Такая система выполняет функции первичного сбора данных с датчиков, обеспечивает базовые контуры автоматического регулирования, отображает информацию в реальном времени и формирует исторический архив технологических параметров.

Первым практическим шагом в модернизации неавтоматизированной котельной стала разработка и внедрение SCADA-системы. Основная цель – создание единого информационно-управляющего контура, обеспечивающего переход от эмпирического ручного управления к цифровому управлению на основе данных. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1) обеспечен сбор телеметрической информации со всех ключевых точек технологического процесса (датчики температуры, давления, расхода, уровня и состояния оборудования);

2) реализованы базовые алгоритмы автоматического управления для стабилизации основных технологических параметров (например, температуры в подающем трубопроводе);

3) создан человеко-машинный интерфейс (HMI) для интуитивно понятной визуализации состояния всего технологического процесса в реальном времени;

4) организовано надежное архивирование данных (исторические тренды) и логирование всех событий и действий оператора.

SCADA спроектирована по классической трехуровневой схеме [2].

Полевой уровень отвечает за съем данных и прямое воздействие на оборудование. Состоит из датчиков (давления, температуры, расхода), преобразователей и исполнительных механизмов (клапаны, частотные регуляторы). Его задача – превращать физические величины в унифицированные сигналы и исполнять команды.

Уровень управления (контроллерный) обеспечивает двусторонний обмен данными между полем и верхним уровнем. Реализован на программируемых логических контроллерах (ПЛК), промышленных шлюзах и сетевом оборудовании. ПЛК исполняют локальные алгоритмы и гарантируют надежность регулирования.

Верхний (диспетчерский) уровень собирает, хранит, обрабатывает и визуализирует всю информацию. Включает серверы, рабочие станции операторов и сетевое оборудование в диспетчерской. SCADA-софт обеспечивает HMI, ведение архивов и журналов, формирование отчетов – все необходимое для принятия решений.

Аппаратное и программное обеспечение SCADA-системы, используемой для автоматизации газовых котельных, должно соответствовать следующим требованиям: человеко-машинный интерфейс должен быть простым и удобным; подключение и диагностика оборудования должны быть автоматическими после восстановления питания; информация должна измеряться, обрабатываться и храниться регулярно; управляющие воздействия должны быть высокоточными; система должна допускать модернизацию.

На рынке представлены различные зарубежные и отечественные SCADA-системы. В данном проекте выбрана отечественная система MasterSCADA 4D от компании InSAT. Ключевые особенности этой системы: объектно-ориентированный подход, позволяющий настраивать систему под конкретную задачу; совместимость с широким спектром оборудования, используемого в газовых котельных; встроенная библиотека для создания человеко-машинного интерфейса; совместимость с популярными СУБД; возможность модернизации.

На объекте в Вологде был проведен анализ установленного оборудования на предмет его совместимости с MasterSCADA и соответствия требованиям импортозамещения.

Основные компоненты: отечественный контроллер ОВЕН PLC110-220.30.P-MS4-3[M02] с поддержкой нужных протоколов; датчики давления ОВЕН ПД100-ДИ (вода – 0,016–40 МПа); метран 55-ДИ18 (газ – 0,25–2,5 МПа); датчики температуры ДТС 095-50М.В3.100 (вода и дымгазы – 0,4–10 МПа); фотодатчики FSP 1.2 для контроля пламени в котле; измерение давления/разрежения воздуха АДН-50.2, АДР-50.2 (–50…50 кПа); расходомеры: ВТК RSC (0–2,5 МПа); насосы и преобразователи Wilo, OMRON (11–30 кВт).

Схема подключения изображена на рис. 1.

Схема подключения показывает, что датчики и частотники связаны с ПЛК через RS-485 (протокол Modbus, двусторонний обмен). Топология – «длинная линия». Реле сигнализации и статуса котлов подключены к дискретным входам/выходам. Преобразователь протоколов связывает все ПЛК с компьютером оператора. Данные из котельной передаются в центр управления через GSM. Программа создается в MasterPLC Designer и загружается в контроллер.

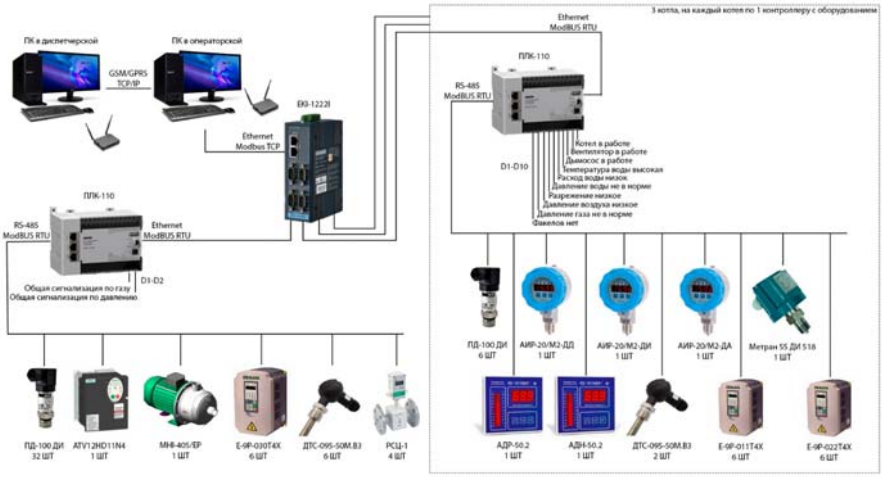


Рис. 1. Схема подключения оборудования

Правильно спроектированный и реализованный человеко-машинный интерфейс создает единое рабочее пространство оператора для централизованного управления и визуального контроля всего процесса. Графические мнемосхемы, являющиеся ядром интерфейса, обеспечивают наглядное отображение текущего состояния контрольно-измерительных приборов и исполнительных механизмов. Они отображают ключевые параметры процесса в реальном времени: давление в различных контурах, температуру теплоносителя и дымовых газов, частоту вращения сетевых насосов, вентиляторов и дымососов. Разработанная мнемосхема в программе MasterSCADA 4D показана на рис. 2.

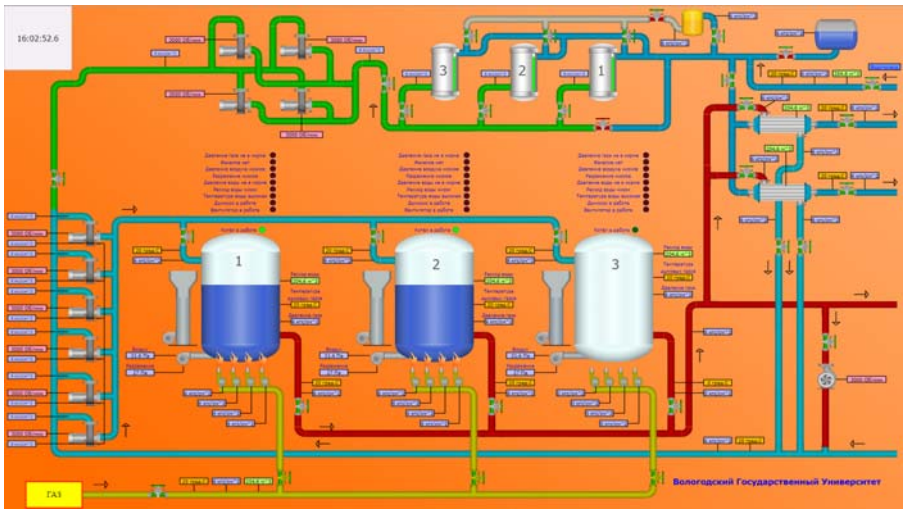


Рис. 2. Мнемосхема

В ходе выполнения работы была разработана и внедрена SCADA-система для неавтоматизированной газовой котельной в Вологде. Внедрение SCADA-системы позволило: перейти от ручного управления к цифровому контролю; повысить ситуационную осведомленность персонала; сократить время реагирования на отклонения; создать цифровую историю работы объекта.

Литература

1. Боровков, В. М. Теплотехническое оборудование : учебник / В. М. Боровков, А. А. Калютик, В. В. Сергеев. – М. : Академия, 2015. – 192 с.
2. Бойер, С. А. SCADA: системы диспетчерского управления и сбора данных : рук. по промышл. системам управления (безопасность) / С. А Бойер. – CRC Press, 2018.

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР СОПРОТИВЛЕНИЙ 50−75 Ом

В. Д. Ходина, Е. А. Маныкина

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», г. Минск

Научный руководитель В. Н. Шашок

Решена задача широкополосного согласования волновых трактов радиотехнических систем на основе минимаксного критерия Чебышева с использованием частотного преобразования Матея. Приведен пример такого решения на примере согласования цепей с сопротивлением 50 и 75 Ом в полосе УКВ диапазона.

Ключевые слова: трансформатор сопротивлений, квазиполосовая аппроксимирующая функция передачи, частотное преобразование Маттея.

Увеличение задач, выполняемых современными радиотехническими системами (РТС), усложнение помеховой обстановки и использование противником средств противодействия требует постоянного их совершенствования и модернизации. Одними из направлений развития РТС являются применение широкополосных сигналов и новых сложных алгоритмов их обработки, освоение новых и расширение уже используемых частотных диапазонов. При осуществлении таких направлений актуальным является решение задач реализации широкополосных антенно-фидерных трактов РТС.

Примером антенн, обладающих широким диапазоном рабочих частот, являются биконические антенны и антенны Наденeнко. Однако наряду с широким диапазоном рабочих частот данные антенны имеют меньший входной импеданс (50 Ом). В таком случае при замене узкополосного полуволнового вибратора рассматриваемыми антеннами возникает необходимость согласования малого импеданса антенн с волновым сопротивлением 75 Ом линий передачи.

На практике данная задача обычно решается включением между согласуемыми трактами четвертьволнового трансформатора. В случае необходимости обеспечения широкого диапазона рабочих частот согласуемых трактов используются несколько последовательно включенных четвертьволновых отрезков. Однако такие конструкции в метровом и более низком частотных диапазонах могут иметь значительные габариты. Также их недостатком является наличие дополнительных полос пропускания.

Для решения задачи широкополосного согласования трактов предлагается использовать реактивные четырехполюсники с квазиполосовой функцией передачи. Данная функция является модификацией полиномов Чебышева первого рода частотным преобразованием Матея [1]:

$$\omega' = \frac{2\omega^2 - \omega_в^2 - \omega_н^2}{\omega_в^2 - \omega_н^2},$$

где $\omega_н$ и $\omega_в$ – нижняя и верхняя границы диапазона рабочих частот.

Так как такие четырехполюсники синтезированы на основе полиномов Чебышева первого рода, они имеют оптимальную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) по минимаксному критерию. Неравномерность их АЧХ в диапазоне рабочих частот определяется коэффициентом перекрытия диапазона рабочих частот и порядком выбранной функции передачи.

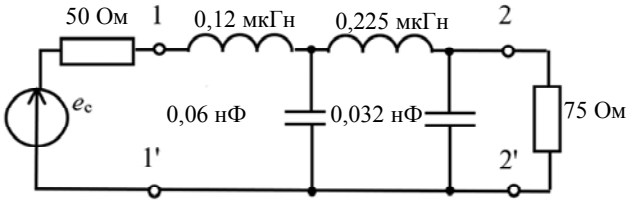
Данные широкополосные четырехполюсники, обладающие трансформирующими свойствами, при использовании высокодобротных реактивных элементов, например, японской компанией Murata Manufacturing Co., Ltd, могут применяться не только в метровом частотном диапазоне, но и выше. Также их достоинством являются малые весогабаритные характеристики.

Примером квазиполосовой функции передачи мощности, полученной модификацией полиномов Чебышева первого рода второго порядка частотным преобразованием Маттея для реализации прототипа широкополосного трансформатора лестничного типа четвертого порядка с коэффициентом перекрытия диапазона рабочих частот $\omega_в / \omega_н = 2,$ является выражение:

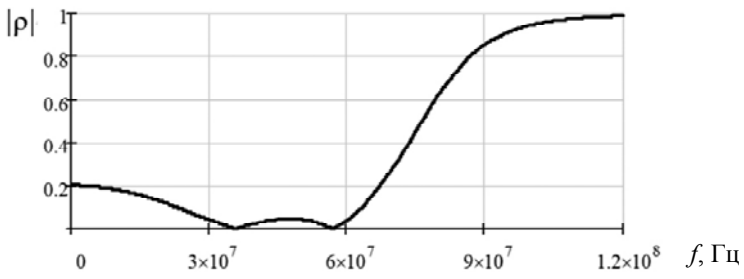
$$K\left(-s^2\right)=\frac{1}{0{,}4096s^8+1{,}024s^6+0{,}9024s^4+0{,}328s^2+1{,}042},$$

где $s=\sigma+j\omega$ – комплексная частота.

На рис. 1 представлены широкополосный трансформатор сопротивлений, синтезированный на основе приведенной функции передачи с денормированными значениями элементов для ультракороткого диапазона волн (УКВ), а также частотная зависимость его коэффициента отражения.



а)



б)

Рис. 1. Принципиальная схема (*а*) и частотная характеристика модуля коэффициента отражения (*б*) синтезированного широкополосного трансформатора сопротивлений

Как видно из рис. 1, *б*, частотная характеристика модуля коэффициента отражения синтезированного широкополосного трансформатора в УКВ диапазоне (30−60 МГц) имеет равноволновой характер, что согласно минимаксному критерию обеспечивает минимальные потери сигнала в диапазоне рабочих частот при заданном отношении согласуемых сопротивлений. Использование такого трансформатора снижает потери мощности сигнала с 4 % до практически несущественной величины.

Таким образом, применение полиномов Чебышева первого рода четного порядка, модифицированных частотным преобразованием Маттея, позволяет приблизить характеристики широкополосного трансформатора сопротивлений к параметрам идеальной трансформирующий цепи, эффективно решать задачи широкополосного согласования волноводных трактов РТС.

Литература

1. Mattei, G. L. Tables for calculating the transformers-resistances as filter of the lower frequencies by Chebyshev / G. L. Mattei // TIIER. – 1964. – N 52 (8). – P. 1003–1028.

ЦИФРОВОЙ БИХ-ФИЛЬТР С ПОВЫШЕННОЙ ЛИНЕЙНОСТЬЮ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А. А. Худзик, В. Д. Ходина

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», г. Минск

Решена задача синтеза цифрового БИХ-фильтра на основе аналогового прототипа с нарастающеволновой функцией передачи по методу билинейного преобразования. Приведены частотные характеристики синтезированного фильтра, подтверждающие повышенную линейность его ФЧХ при заданной частотной избирательности.

Ключевые слова: цифровые фильтры, цепи с нарастающеволновой функцией передачи, метод билинейного преобразования.

Задача реализации основных частотно-избирательных функций в современных радиотехнических системах (РТС) выполняется, как правило, программным способом. Такое решение объясняется рядом существенных преимуществ цифровой фильтрации сигналов в сравнении с аналоговой, основными из которых являются возможность гибкого управления параметрами фильтрации при адаптации систем под различные стандарты обрабатываемых сигналов, высокая точность и стабильность параметров, удобство сопряжения с цифровыми устройствами управления.

При таком решении актуальным остается требование минимизации вносимых частотных искажений цепями фильтрации, особенно при использовании сложных широкополосных сигналов, эффективность применения которых зависит от сохранения их частотной структуры в процессе обработки в радиотехнических трактах. По этой причине наиболее широкое применение в РТС получили цифровые КИХ-фильтры, имеющие линейную фазочастотную характеристику (ФЧХ). Однако данные фильтры при обеспечении высокой частотной избирательности имеют большие порядки, что требуют значительных вычислительных ресурсов. Такое требование не всегда выполнимо при использовании маломощных вычислительных чипов и необходимости обработки сигналов в режиме реального времени, т. е. в течение одного тактового интервала.

Существенно меньшим порядком, а значит, и меньшей вычислительной нагрузкой при той же избирательности, обладают БИХ-фильтры. Однако при таком преимуществе данные фильтры имеют нелинейную ФЧХ. Причем нелинейность характеристики возрастает с увеличением порядка фильтров.

Так как синтез БИХ-фильтров выполняется на основе их аналоговых прототипов, то задачу уменьшения вносимых частотных искажений необходимо решать на начальном этапе выбора исходной аппроксимирующей функции передачи синтезируемого фильтра-прототипа. Для решения вышеприведенной задачи в качестве исходной может быть использована нарастающеволновая функция передачи, позволяющая синтезировать цепи, частично сочетающая в себе избирательность цепей с равноволновой функцией передачи, оптимально приближенной по виду амплитудно-частотной функции (АЧХ) к идеальному фильтру по критерию Чебышева, и малую нелинейность ФЧХ цепей с максимально плоской функцией передачи, оптимальных по критерию Тейлора [1]. Математическая запись такой аппроксимирующей функции имеет вид:

$$K\left(-s^2\right)=\frac{k^2}{1+\varepsilon^2\left(-1\right)^{n-m}s^{2(n-m)}T_{\text{Cheb}}^2\left(m,\,s\right)},$$

где n – порядок синтезируемого фильтра; $k\le 1$ – константа, характеризующая уровень передачи ЭДС источника сигнала в нагрузку синтезируемого фильтра-прототипа на частоте $\omega=0$; $s=\sigma+j\omega$ – комплексная частота; ε – коэффициент неравномерности амплитудно-частотной характеристики синтезируемого фильтра в полосе пропускания; $T_{\text{Cheb}}(m,\,s)$ – полином Чебышева первого рода порядка m.

Для синтеза БИХ-фильтра, перевода переменной из s- в z-плоскость, используем метод билинейного преобразования функции передачи аналогового фильтра-прототипа [2]. При применении такого метода полосы пропускания, образующиеся в результате перехода, остаются изолированными, в отличие от метода инвариантного преобразования импульсной характеристики. Сжатие частотной оси, характерное для метода билинейного преобразования, учтем предварительной коррекцией исходного значения граничной частоты аппроксимируемой функции передачи аналогового фильтра-прототипа.

Для примера выберем в качестве аппроксимирующей нарастающеволновую функцию относительно невысокого пятого порядка $(n=5)$. При условии, что $m=3$, $\varepsilon=0{,}349$ (1 дБ) и $k=1$, такая функция примет вид:

$$K\left(-s^2\right)=\frac{1}{-1{,}952\,s^{10}-2{,}928\,s^8-1{,}098\,s^6+1}.$$

Данной функции передачи мощности соответствует функция передачи ЭДС источника сигнала в нагрузку:

$$K\left(s\right)=\frac{1}{1{,}397\,24\,s^5+3{,}461009\,s^4+5{,}334\,445\,s^3+5{,}261997\,s^2+3{,}244\,071\,s+1{,}0}.$$

При заданном выше условии уменьшения вычислительных ресурсов рассмотрим фильтр нижних частот, используемый в трактах приема с системой цифровой обработки в квадратурных каналах. Выберем в примере значение граничной частоты синтезируемого низкочастотного БИХ-фильтра $\omega_{z\text{г}} = 4{,}398 \cdot 10^6$ рад/с ($f_{z\text{г}} = 0{,}7 \cdot 10^6$ Гц). Для обеспечения заданного значения граничной частоты цифрового фильтра с учетом частоты дискретизации $f_{\text{д}} = 120 \cdot 10^6$ Гц ($T = 8{,}333 \cdot 10^{-9}$ с) выполним коррекцию граничной частоты аналогового прототипа, используя выражение:

$$\omega_{s\text{г}} = \frac{2}{T}\operatorname{tg}\left(\frac{\omega_{z\text{г}} T}{2}\right) = \frac{2}{8{,}333 \cdot 10^{-9}}\operatorname{tg}\left(\frac{4{,}398 \cdot 10^6 \; 8{,}333 \cdot 10^{-9}}{2}\right) = 4{,}399 \cdot 10^6 \text{ рад/с}.$$

Так как частота дискретизации достаточно велика и $\omega_{z\text{г}} T << 1$, то $\omega_{s\text{г}} \approx \omega_{z\text{г}}$.

Функция передачи низкочастотного аналогового фильтра с денормированной частотой относительно корректированной граничной частоты примет вид:

$$K\left(s/\omega_{s\text{г}}\right) = \frac{1}{8{,}48 \cdot 10^{-34} s^5 + 9{,}25 \cdot 10^{-27} s^4 + 6{,}27 \cdot 10^{-20} s^3 + 2{,}72 \cdot 10^{-13} s^2 + 7{,}38 \cdot 10^{-7} s + 1{,}0}.$$

Подставив вместо переменной *s* ее *z*-отображение с использованием выбранного метода билинейного преобразования, с учетом выбранной частоты дискретизации $T = 8{,}333 \cdot 10^{-9}$ с, получим передаточную функцию БИХ-фильтра с нарастающеволновой функцией передачи

$$K(z) = \frac{b(0) + b(1)z^{-1} + b(2)z^{-2} + b(3)z^{-3} + b(4)z^{-4} + b(5)z^{-5}}{1 - a(1)z^{-1} - a(2)z^{-2} - a(3)z^{-3} - a(4)z^{-4} - a(5)z^{-5}}, \qquad (1)$$

где

$$b(0) = b(5) = 1{,}414103020044094174 \cdot 10^{-9};$$

$$b(1) = b(4) = 7{,}070515100220470869 \cdot 10^{-9};$$

$$b(2) = b(3) = 1{,}414103020044094174 \cdot 10^{-8};$$

$$a(1) = 4{,}908217443623820558;$$

$$a(2) = -9{,}638\,042\,652\,217\,250\,976;$$

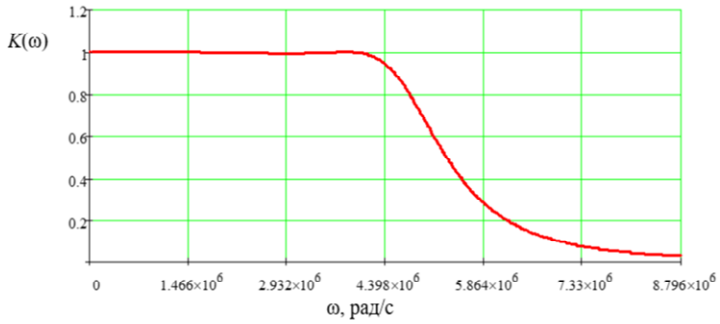
$$a(3) = 9{,}464637961086217222;$$

$$a(4) = -4{,}648\,021\,857\,900\,433\,891;$$

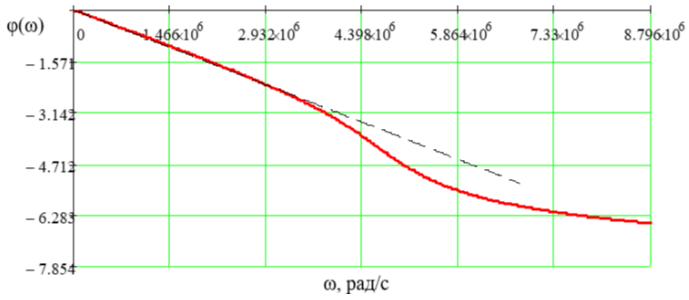
$$a(5) = 9{,}306795471351223510 \cdot 10^{-1}.$$

В *z*-области полученная функция представляет комплексную поверхность. Пересечение данной поверхности цилиндром, основанием которого является единичная окружность $z = e^{j\omega T}$, образует комплексную частотную характеристику синтезируемого БИХ-фильтра. Модуль такого сечения представляет собой кривую, приведенную на рис. 1, *а* и являющуюся АЧХ фильтра:

$$\left|K(z)\right|_{z=e^{j\omega T}} = \left|K(\omega)\right|.$$



а)



б)

Рис. 1. Амплитудно-частотная (*а*) и фазочастотная (*б*) характеристики БИХ-фильтра с функцией передачи (1)

На рис. 1, *б* также приведена ФЧХ синтезированного БИХ-фильтра, имеющая повышенную линейность в полосе пропускания. Данные характеристики цифрового фильтра соответствуют характеристикам своего аналогового прототипа. Благодаря нарастающеволновым свойствам функции передачи фильтр частично сочетает свойства повышенной линейности ФЧХ и заданной частотной избирательности цепей с максимально плоской и равноволновой функциями передачи соответственно.

Литература

1. Шашок, В. Н. Синтез цепей с нарастающеволновой функцией передачи / В. Н. Шашок // Доклады БГУИР. – 2011. – № 8 (62). − С. 52−58.
2. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М. : Бином-Пресс, 2006. – 656 с. : ил.

ЭКВИВАЛЕНТЫ АНТЕНН И ИХ РАЗВИТИЕ

Е. А. Манькина, Е. С. Ридецкая

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», г. Минск

Научный руководитель В. Н. Шашок

Выполнен анализ методов синтеза эквивалентов антенн. Указано, что совместное применение классических методов синтеза эквивалентов антенн с программно-аппаратными средствами позволяет обеспечить высокие требования при решении задач синтеза эквивалентов, используемых в современных и разрабатываемых РТС.

Ключевые слова: метод синтеза цепей, эквиваленты антенн.

Радиотехнические системы, работающие с электромагнитным излучением, в обязательном порядке содержат антенные устройства, которые также определяют их характеристики. При выполнении испытательных работ, функционального контроля, поиска неисправностей таких систем не всегда существует возможность использования их антенных устройств. В РТС военного применения это ограничение связано с наличием демаскирующего фактора, позволяющего противнику обнаружить источник излучения. Высокий уровень излучения ухудшает электромагнитную обстановку в зоне проведения испытательных работ. Нежелательным излучение является также и по медицинским показателям, так как высокие мощности излучаемых сигналов отрицательно влияют на состояние здоровья операторов станций. Для проведения таких и подобных работ применяются эквиваленты антенн, важнейшим требованием к которым является соответствие их входного импеданса параметрам заменяемых антенн в диапазоне рабочих частот.

В самом простом случае эквиваленты состоят из резистора с сопротивлением, равным волновому сопротивлению фидера (обычно 50 или 75 Ом). Однако при своей исключительной простоте резистивные эквиваленты не учитывают частотную зависимость импеданса антенны. Приемлемую точность имитации импеданса реальной антенны в диапазоне ее рабочих частот обеспечивают многозвенные RLC-эквиваленты благодаря наличию дополнительных LC элементов. Традиционно при решении задач проектирования таких эквивалентов используются методы синтеза цепей, применяется теория согласования сложных нагрузок по заранее измеренным характеристикам реальных антенн [1].

Современное развитие антенной техники, создание новых классов антенн, широкое применение фазированных антенных решеток требуют учета взаимного влияния рядом расположенных антенн. Например, размещение большого количества антенн на общей платформе (на бортах самолетов, кораблей), влияние окружающих антенну объектов на ее характеристики требует использования более новых методик и подходов к реализации современных эквивалентов антенных. Такие подходы могут быть выполнены применением активных эквивалентов и программно-аппаратных комплексов. Активные эквиваленты дополнительно к RLC содержат и активные элементы, что позволяет более точно моделировать нелинейные характеристики антенн. Применение в настоящее время программно-аппаратных комплексов благодаря использованию цифровых технологий позволяет с максимальной точностью имитировать импеданс сложных широкополосных антенн.

Таким образом, совместное применение классических методов синтеза эквивалентов антенн с программно-аппаратными средствами позволяет обеспечить высокие требования при решении задач синтеза эквивалентов, используемых в современных и разрабатываемых РТС.

Литература

1. Circuit Modelling of Broadband Antenna Using Vector Fitting and Foster Form Approaches for IoT Applications / F. Ez-zaki, K. A. Belaid, S. Ahmad [et al.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11. – P. 3724. – DOI 10.3390/electronics11223724

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

В. А. Сацура

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

Научный руководитель М. Н. Погуляев

Рассмотрены интеллектуальные методы оптимизации управления электроприводами, включая нейронные сети и нечеткую логику. Основное внимание уделено алгоритмическим особенностям, структурам регуляторов и способам настройки параметров. Приведены математические модели и методы их реализации в системах управления электродвигателями. Показано, что применение интеллектуальных методов позволяет существенно повысить качество управления в условиях нелинейности и неопределенности параметров.

Ключевые слова: электропривод, оптимизация, нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы, адаптивное управление.

Рассмотрим электропривод как объект управления, описываемый системой дифференциальных уравнений:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M - M_{\text{н}}, \quad L\frac{di}{dt} = U - R_i - K_e\omega, \tag{1}$$

где ω – угловая скорость; M – электромагнитный момент; $M_{\text{н}}$ – нагрузочный момент.

Классические ПИД-регуляторы используют фиксированные коэффициенты K_p, K_i, K_d, что ограничивает их эффективность при изменении параметров системы. Интеллектуальные методы направлены на адаптивную или оптимальную настройку этих параметров.

Нейросетевые методы управления. Нейронная сеть используется для аппроксимации функции управления:

$$u = f(x, w), \tag{2}$$

где x – вектор состояния; w – веса сети.

На практике применяются многослойные перцептроны с обучением по алгоритму обратного распространения ошибки. Функция ошибки имеет вид:

$$E = \frac{1}{2}\sum (y_{ref} - y)^2. \tag{3}$$

Градиентное обновление весов:

$$w_{ij}^{(k+1)} = w_{ij}^{(k)} - \eta\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}. \tag{4}$$

В электроприводах нейросети применяются для следующего:

– идентификации нелинейной модели двигателя;

– адаптивной настройки ПИД-регуляторов;

– прямого синтеза управляющего сигнала (нейроконтроллер).

Особый интерес представляет метод обратного управления (inverse control), где сеть обучается аппроксимировать обратную динамику привода.

Нечеткие регуляторы. Нечеткое управление основано на правилах:

$$\text{если } e \text{ есть } A_i \text{ и } \dot{e} \text{ есть } B_j, \text{ то } u = C_{ij}, \tag{5}$$

где e – ошибка, $\dot{e}$ – производная ошибки.

Функции принадлежности обычно задаются треугольными или гауссовыми функциями:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right). \tag{6}$$

Алгоритм работы нечеткого регулятора:

1. Фаззификация входных переменных.
2. Применение базы правил.
3. Агрегация результатов.
4. Дефаззификация (например, методом центра тяжести):

$$\mu = \frac{\int \mu(u) u \, du}{\int \mu(u) \, du}. \tag{7}$$

Нечеткие регуляторы эффективно заменяют ПИД в условиях:

– нелинейности;

– отсутствия точной модели;

– изменяемой нагрузки.

Нейронечеткие системы. Комбинированная модель ANFIS описывается как:

$$y = \sum_i w_i(x) f_i(x), \tag{8}$$

где веса w_i определяются нечеткими правилами, а параметры обучаются нейросетью.

Такие системы позволяют:

– автоматически настраивать функции принадлежности;

– адаптировать правила управления;

– повышать точность при сохранении интерпретируемости.

Методы оптимального и адаптивного управления. Используется критерий оптимальности:

$$J = \int_0^\infty \left(x^t Q x + u^T R u\right) dt. \tag{9}$$

Решение приводит к линейно-квадратичному регулятору:

$$u = -K_x, \tag{10}$$

где матрица K определяется через решение уравнения Риккати.

Интеллектуальные методы применяются для следующего:

– онлайн-оценки матриц Q, R;

– адаптации коэффициентов в реальном времени.

Таким образом, интеллектуальные методы оптимизации управления электроприводами реализуются через конкретные алгоритмы обучения, оптимизации и ло-

гического вывода. Их применение позволяет существенно повысить качество регулирования за счет адаптации к нелинейностям, неопределенностям и изменяющимся условиям работы.

Литература

1. Ким, Д. П. Теория автоматического управления / Д. П Ким. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – Т. 1. Линейные системы. – 288 с.
2. Хайкии, С. Нейронные сети: полный курс : пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2016. – 1104 с. : ил.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ, ПОВЫШАЮЩИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Чжан Чжунбинь

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, Шаньдунский технологический институт Хуаюй, г. Дэчжоу, Китайская Народная Республика

Научный руководитель В. А. Савельев

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

Проведен сравнительный анализ алгоритмов управления матричными преобразователями частоты, направленный на максимизацию энергоэффективности современных систем электропривода. Основное внимание уделено интеграции методов искусственного интеллекта и машинного обучения, включая искусственные нейронные сети и глубокое обучение с подкреплением, для решения проблемы вычислительной сложности классических методов. Приведены численные показатели эффективности (КПД, коэффициент гармоник, время выполнения), подтверждающие перспективность интеллектуальных систем управления.

Ключевые слова: матричный преобразователь частоты, энергоэффективность, искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети, обучение с подкреплением, электропривод.

В условиях глобального перехода к энергосберегающим технологиям и цифровизации промышленности оптимизация работы электропривода, потребляющего до 60 % всей вырабатываемой электроэнергии, становится первоочередной задачей. Традиционные двухзвенные преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока имеют ряд недостатков: наличие громоздких электролитических конденсаторов, ограниченный срок службы и потери при двукратном преобразовании энергии.

Матричный преобразователь частоты (МПЧ) представляет собой одну из наиболее перспективных топологий в силовой электронике, обеспечивающую прямое преобразование переменного тока в переменный (*AC*/*AC*) без использования промежуточного звена постоянного тока. В отличие от традиционных двухзвенных преобразователей МПЧ реализует концепцию «полностью кремниевого преобразователя», что существенно повышает его удельную мощность и надежность. МПЧ позволяет достичь более высокой удельной мощности, надежности и КПД до 98 %. Однако сложность топологии требует разработки высокопроизводительных алгоритмов управления, способных работать в реальном времени при высоких частотах дискретизации. Использование искусст-

венного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) открывает новые горизонты для преодоления вычислительного «узкого места» и дальнейшего повышения энергоэффективности систем.

Цель работы – провести глубокий анализ существующих и перспективных алгоритмов управления МПЧ с акцентом на применение технологий ИИ и МО для повышения энергетической эффективности и динамических характеристик электропривода.

В работе решены следующие задачи: выполнено сравнение энергетических и массогабаритных показателей МПЧ и традиционных преобразователей; проанализированы ограничения классических методов управления; дана оценка эффективности применения искусственных нейронных сетей и глубокого обучения с подкреплением в задачах управления током МПЧ; систематизированы результаты экспериментальных исследований, подтверждающих превосходство интеллектуальных алгоритмов.

Исторически для МПЧ применялась пространственно-векторная модуляция (*Space Vector Modulation – SVM*). При *SVM* вычисляются не мгновенные значения напряжений, прикладываемых к обмоткам, а моменты подключения обмоток к силовому мосту с целью формирования заданного вектора напряжения. *SVM* обеспечивает синусоидальность токов и управление коэффициентом мощности, однако ограничена коэффициентом передачи напряжения 0,866 и высокой сложностью реализации при несимметричных режимах сети.

Модельно-прогностическое управление (*Model Predictive Control – MPC*) стало популярным благодаря быстрому динамическому отклику и легкости учета системных ограничений. *MPC* использует динамическую модель процесса для прогнозирования его поведения в будущем временном интервале, а затем оптимизирует управляющие воздействия с учетом ограничений. Главный недостаток *MPC* – колоссальная вычислительная нагрузка. Для выбора оптимального состояния на каждом шаге необходимо рассчитывать целевую функцию для 27 состояний, а при многошаговом прогнозировании нагрузка возрастает экспоненциально.

Одной из наиболее эффективных стратегий является имитационное обучение, где искусственная нейронная сеть (*Artificial Neural Network – ANN*) обучается на данных, полученных от *MPC*-контроллера.

В экспериментах время выполнения 2-шагового *MPC* составило 14,62 с, тогда как обученная *ANN* выполнила ту же задачу за 0,99 с. Это почти 15-кратное ускорение позволяет использовать более высокую частоту дискретизации.

ANN-контроллер показал коэффициент суммарных гармонических искажений (*Total Harmonic Distorsions – THD*) тока нагрузки на уровне 1,85 %, превзойдя классический 1-шаговый *MPC* с его 2,23 %.

При резком изменении нагрузки пиковый выброс тока в системе с *ANN* составил 10,6 А, в то время как у *MPC* – 30,2 А.

Инновационный подход на базе алгоритма обучения с подкреплением (*Deep Q-Network – DQN*) позволяет агенту обучаться оптимальной стратегии управления путем прямого взаимодействия со средой (МПЧ).

Симуляционные тесты показали, что *DQN* обеспечивает среднеквадратичную ошибку (*Mean Squared Error – MSE*) тока нагрузки 0,0396, что существенно точнее показателей *MPC* (0,202).

Таким образом, вся вычислительная сложность переносится на этап оффлайн-обучения, что позволяет использовать недорогие процессоры для реализации алгоритма в режиме реального времени.

Нечеткая логика (*Fuzzy Logic Control – FLC*) эффективно применяется для управления приводами в тяжелых условиях с неопределенными параметрами, например, в цементной промышленности. Применение *FLC* в связке с МПЧ позволяет: минимизи-

ровать пульсации момента, плавно адаптировать скорость асинхронного двигателя к колебаниям нагрузки на мельницах и дробилках, снижая тепловые потери и механический износ.

Для реализации сложных нейросетевых алгоритмов в реальном времени все чаще используются системы на кристалле (*System-on-a-Chip – SoC*), объединяющие микропроцессоры и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС/*FPGA*). Использование специализированных гибридных аналого-цифровых нейропроцессоров позволяет еще больше снизить энергопотребление самих систем управления за счет выполнения вычислений непосредственно внутри памяти (*In-Memory Computing*), что дает до 100 раз меньшее энергопотребление по сравнению с классическими графическими процессорами.

Анализ современных алгоритмов управления МПЧ показывает, что интеграция искусственного интеллекта является ключом к созданию энергоэффективного электропривода нового поколения:

1. МПЧ обеспечивает КПД до 98 % и сокращение объема устройства в 2 раза за счет исключения звена постоянного тока.

2. Использование нейронных сетей позволяет сократить время выполнения сложных прогностических алгоритмов более чем в 10–15 раз при сохранении или улучшении качества выходного тока (*THD* < 2 %).

3. Методы глубокого обучения с подкреплением (*DQN*) демонстрируют пятикратное превосходство в точности управления током по сравнению с классическими методами *MPC*.

Будущие исследования должны быть направлены на создание автономных систем онлайн-обучения и диагностику состояния силовых ключей с помощью ИИ для повышения живучести электротехнических комплексов.

Литература

1. Novel Deep Reinforcement Learning-Based Current Control Method for Direct Matrix Converters / Yao Li, Lin Qiu, Xing Liu [et al.] // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 2146.
2. Sharma, A. AI Control Based Matrix Converter Fed Induction Motor Drives in Cement Industries / Akshay Sharma, Vinod Kumar // Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent and Sustainable Power and Energy Systems (ISPES 2024). – P.140–149.
3. Gounder, Y. K. Application of machine learning controller in matrix converter based on model predictive control algorithm / Y. K. Gounder, Sowkarthika Subramanian // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). – 2023. – Sept. – Vol. 14, N 3. – P. 1489–1496.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Чжан Лифан

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, Шаньдунский технологический институт Хуаюй, г. Дэчжоу, Китайская Народная Республика

Научный руководитель В. А. Савельев

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

Проведен комплексный анализ программных фреймворков и методов оптимизации моделей машинного обучения для работы на микроконтроллерах с крайне ограниченными

ресурсами. Рассмотрены современные аппаратные платформы и инновационные стратегии управления питанием. Проанализированы результаты практического внедрения проектов на базе TinyML в различных отраслях промышленности. По итогам исследования сформулированы научно обоснованные рекомендации по созданию энергоэффективных систем удаленного мониторинга промышленного оборудования.

Ключевые слова: интеллектуальный мониторинг, промышленное оборудование, предиктивная аналитика, машинное обучение, Интернет вещей, граничный искусственный интеллект.

В рамках концепции «Индустрии 4.0» удаленный мониторинг промышленного оборудования играет ключевую роль в предотвращении аварийных остановок и оптимизации производственных циклов. Традиционные подходы к мониторингу сталкиваются с проблемой высокой нагрузки на каналы связи и быстрым разрядом батарей датчиков из-за необходимости передачи больших массивов «сырых» данных в облачные хранилища. Передача данных является основным фактором энергопотребления в беспроводных сенсорных узлах.

TinyML (Tiny Machine Learning) представляет собой перспективную область искусственного интеллекта, ориентированную на развертывание оптимизированных моделей непосредственно на микроконтроллерах (МК) с ультранизким энергопотреблением. Это позволяет реализовать концепцию «вычислений на борту», где данные анализируются локально, а в сеть передаются только важные признаки или сигналы о неисправностях, что радикально продлевает срок автономной работы устройств.

Цель работы – исследование комплексных методов аппаратной и программной реализации TinyML для повышения энергоэффективности и автономности систем промышленного мониторинга.

Задачи исследования:

– выполнить анализ программных фреймворков и методов оптимизации моделей для работы на ресурсоограниченных МК;

– рассмотреть аппаратные платформы и стратегии управления питанием;

– проанализировать результаты практической реализации проектов на базе TinyML;

– разработать рекомендации по применению аппаратно-программных средств для создания устройств энергоэффективного мониторинга.

Эффективная реализация технологий TinyML в промышленной среде требует гармоничного сочетания специализированного программного обеспечения и оптимизированных алгоритмов. Одним из ключевых инструментов в этой области выступает фреймворк TensorFlow Lite for Microcontrollers, который позволяет запускать модели машинного обучения на 32-битных процессорах без необходимости в операционной системе. Важнейшим методом оптимизации здесь является 8-битное квантование, позволяющее в четыре раза сократить объем занимаемой памяти при сохранении высокой точности вычислений. В то же время для промышленного мониторинга часто предпочтительнее использовать проприетарные решения, такие как STM32Cube.AI, которые демонстрируют значительное превосходство в скорости инференса и эффективности сжатия кода по сравнению с универсальными библиотеками. Дополнительное ускорение вычислений достигается за счет интеграции с ядрами CMSIS-NN, использующими специфические инструкции процессоров ARM для быстрой обработки нейросетевых операций.

Аппаратный фундамент современных систем мониторинга строится на базе микроконтроллеров с ультранизким энергопотреблением, среди которых выделяются чипы серии nRF52, способные функционировать до четырех лет от одного миниатюрного элемента питания. Широкое распространение получила также платформа Arduino Nano 33 BLE Sense, обладающая богатым набором интегрированных датчиков для анализа вибраций, звуков и климатических условий, что делает ее идеальным узлом для предиктивного обслуживания. В более сложных инженерных задачах доминируют контроллеры семейства STM32, оснащенные блоками вычислений с плавающей запятой, в то время как чипы ESP32 предлагают выгодное сочетание высокой тактовой частоты и встроенных интерфейсов Wi-Fi и Bluetooth для гибкой передачи данных.

Радикальное повышение автономности устройств становится возможным благодаря иерархическим стратегиям управления питанием и переносу аналитики непосредственно «на край» сети. Вместо непрерывного использования энергоемких нейросетей системы применяют быстрое преобразование Фурье (FFT) в качестве первичного фильтра, который активирует основной алгоритм только при обнаружении подозрительной активности. Инновационным решением является интеграция пассивных NFC-интерфейсов, позволяющих датчику находиться в режиме нулевого потребления до момента физического считывания данных или активации внешним полем. Кроме того, использование полевых транзисторов для полного обесточивания неиспользуемой периферии и переход на энергоэффективный протокол BLE позволяют сократить ток потребления системы более чем в сто раз.

Жизнеспособность данных концепций подтверждается многочисленными практическими примерами, включая проект компании Hilti, где интеллектуальные узлы SmartTag обеспечили высокоточный мониторинг работы электроинструмента в течение нескольких лет. Исследования институтов Фраунгофера доказали эффективность TinyML при диагностике состояния фрезерных станков, обеспечив стопроцентную точность распознавания дефектов при минимальных затратах энергии на каждый цикл вычислений. Опыт итальянской фирмы Pietro Fiorentini продемонстрировал возможность реализации алгоритмов детекции аномалий в газовом оборудовании даже в условиях жесткого дефицита оперативной памяти. Наконец, разработки китайских ученых в области каскадных автокодировщиков для диагностики подшипников позволили почти полностью перенести вычислительную нагрузку с центральных серверов на конечные микроконтроллеры.

Исследование показало, что достижение максимальной энергоэффективности в системах удаленного мониторинга возможно только при реализации иерархического подхода, сочетающего оптимизацию архитектуры нейронных сетей (квантование, прунинг), использование специализированных библиотек (CMSIS-NN) и интеллектуальное управление аппаратными ресурсами (NFC-активация, FFT-триггеры).

Перенос аналитики непосредственно на устройство (Edge AI) позволяет выполнять задачи мониторинга в 3 раза чаще при сопоставимом бюджете энергии по сравнению с облачными решениями. Это закладывает фундамент для создания полностью автономных интеллектуальных сенсоров, способных функционировать годами от миниатюрных источников питания.

Литература

1. Design and Performance Evaluation of an Ultralow-Power Smart IoT Device With Embedded TinyML for Asset Activity Monitoring / M. Giordano, N. Baumann, M. Crabolu [et al.] // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. – 2022. – Vol. 71. – Art. 2510711.

2. TinyML Platforms Benchmarking / A. Osman, U. Abid, L. Gemma [et al.]. – Povo : Dept. of Industrial Engineering, University of Trento.
3. Towards Energy-Aware TinyML on Battery-Less IoT Devices / A. Sabovica, M. Aernoutsa, D. Subotica [et al.] // Internet of Things. – Feb. – 2023. – DOI 10.1016/j.iot.2023.100736

СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ Unitree Go2 Edu НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ROS2

В. Е. Назарчук

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

Научный руководитель В. А. Савельев

Представлена система бесконтактного управления роботом-собакой Unitree Go2 Edu с использованием камеры глубины Intel RealSense D435i и библиотеки MediaPipe для распознавания жестов рук. Система интегрирована с ROS2 через специализированный SDK; позволяет роботу выполнять команды «встать», «лечь», «остановиться», «поздороваться». Применен алгоритм стабилизации жестов и фильтрации по глубине для повышения надежности. Реализован графический интерфейс для отладки. Эксперименты подтвердили эффективность подхода: точность распознавания достигла 92 % при нормальном освещении.

Ключевые слова: компьютерное зрение, бесконтактное управление, распознавание жестов, Unitree Go2, ROS2, MediaPipe, Intel RealSense.

Современные роботы все чаще интегрируются в повседневную жизнь человека, и возникает потребность в интуитивно понятных и гигиеничных способах взаимодействия. Бесконтактное управление жестами рук позволяет оператору отдавать команды на расстоянии без использования пультов или сенсорных экранов. В данном докладе описывается разработка системы управления роботом Unitree Go2, которая анализирует видеоизображения с камеры глубины, распознает жесты и передает соответствующие команды через ROS2. На рис. 1 изображен робот Unitree Go2 Edu.

Рис. 1. Робот-собака Unitree Go2 Edu

В качестве исполнительного устройства выбран робот-собака Unitree Go2, оснащенный вычислительным модулем NVIDIA Jetson Orin NX под управлением Ubuntu 20.04. Для захвата видео используется стереокамера Intel RealSense D435i, которая обеспечивает цветное изображение (640 × 480, 30 fps) и карту глубины. Ка-

мера подключается через USB 3.0 и располагается на статическом штативе перед роботом. Робот и компьютер с камерой находятся в одной локальной сети; связь реализована по Ethernet (интерфейс eth0). Выбор D435i обусловлен наличием активного инфракрасного проектора, что позволяет работать при недостаточном освещении.

Система написана на Python 3. Для получения видеопотока с камеры Intel RealSense D435i используется библиотека pyrealsense2, которая обеспечивает захват цветных кадров и карт глубины. Распознавание кистей рук и выделение ключевых точек (суставов) выполняется с помощью фреймворка MediaPipe (модуль mp.solutions.hands), который на каждом кадре строит скелет руки – соединяет точки линиями, как показано на рис. 1. Далее самописная функция recognize_gesture() из модуля naive_from_video.py классифицирует жест (ладонь, кулак, мир и т. д.). Визуализация и обработка клавиш реализованы через OpenCV, а для работы с массивами данных используется NumPy. Непосредственное управление роботом Unitree Go2 осуществляется через Unitree SDK 2.0 (класс SportClient), который предоставляет методы StandUp(), StandDown(), Hello() и StopMove(). Вывод программы изображен на рис. 2.

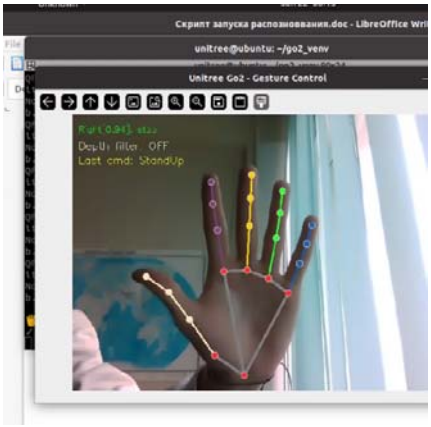


Рис. 2. Вывод программы распознавания жестов

На рис. 2 показан результат работы MediaPipe: на изображение руки наложен скелет из ключевых точек и соединяющих их линий, что позволяет системе понимать форму ладони и положение пальцев.

Разработанная система демонстрирует возможность надежного бесконтактного управления роботом Unitree Go2 с помощью камеры RealSense D435i и методов компьютерного зрения. Использование MediaPipe обеспечивает высокую скорость детекции, а фильтр глубины и стабилизация повышают помехоустойчивость. Интеграция с ROS2 через Unitree SDK позволяет легко расширять функционал (например, добавить навигацию жестами). В дальнейшем планируется обучить нейронную сеть распознавать динамические жесты (свайпы, вращение) для управления движением робота в пространстве.

Литература

1. MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines / C. Lugaresi, J. Tang, H. Nash [et al.]. – 2019. – 12 p. – DOI 10.48550/arXiv.1906.08172
2. Intel RealSense D435i datasheet / Intel Corporation. – 2020. – URL: https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2020/06/Intel-RealSense-D435i-Datasheet.pdf (date of access: 20.03.2026).

3. Unitree SDK 2.0 Documentation / Unitree Robotics. – 2024. – URL: https://github.com/unitreerobotics/unitree_sdk2 (date of access: 20.03.2026).
4. OpenCV: Open Source Computer Vision Library / OpenCV Development Team. – 2024. – URL: https://opencv.org (date of access: 20.03.2026).
5. ROS2 Humble Documentation / Open Robotics. – 2023. – URL: https://docs.ros.org/en/humble (date of access: 20.03.2026).

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКЗОСКЛЕТА

А. А. Белоусов

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

Научный руководитель М. Н. Погуляев

Рассмотрены современные методы повышения энергоэффективности экзоскелетов, включая рекуперацию энергии, оптимизацию приводов, биомеханическую синхронизацию и применение легких конструкционных материалов. Проанализированы технические решения из научных публикаций и патентов, посвященных генерации энергии в суставах, квазипассивным приводам и интеллектуальным алгоритмам управления. Показано, что интеграция рекуперации, адаптивного управления и снижения массы конструкции позволяет увеличить время автономной работы экзоскелета в 1,5–2,5 раза. Представлены перспективные направления развития энергоавтономных систем, включая гибридные источники питания и использование биомеханической энергии пользователя.

Ключевые слова: экзоскелет, энергоэффективность, рекуперация энергии, квазипассивные приводы, биомеханическая синхронизация, интеллектуальное управление, легкие материалы; автономное питание,мотор-генератор, отрицательная работа сустава.

Энергоэффективность является одним из ключевых факторов, определяющих практическую применимость экзоскелетов в медицине, промышленности, военной сфере и мобильной робототехнике. Большинство современных систем ограничены массой аккумуляторов, временем автономной работы и потерями энергии в приводах, что существенно снижает их функциональность и удобство использования. В связи с этим разработка методов повышения энергоэффективности становится важнейшим направлением исследований. Основные источники потерь энергии в экзоскелетах связаны с низким КПД приводов, трением и нагревом редукторов, несогласованностью движений человека и устройства, избыточной массой конструкции, а также неоптимальными алгоритмами управления, которые продолжают активировать приводы даже в тех фазах движения, где можно использовать пассивные элементы. Кроме того, большинство экзоскелетов не используют возможности рекуперации энергии, хотя в человеческой походке и движениях рук присутствуют значительные фазы отрицательной работы, которые потенциально могут быть преобразованы в электрическую энергию.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения энергоэффективности является рекуперация энергии. Современные исследования показывают, что экзоскелеты способны возвращать от 5 до 30 % энергии, затрачиваемой на движение, если использовать генераторные режимы электродвигателей в фазах отрицательной мощности, например, при спуске, опускании руки или торможении шага. Наиболее эффективными точками для рекуперации являются коленный сустав, где наблюдается максимальная отрицательная работа при ходьбе, плечевой сустав при опускании руки и голеностоп при контролируемом приземлении стопы. Помимо электрической

рекуперации применяются механические накопители энергии – пружины, торсионные элементы и эластомеры, которые аккумулируют энергию в фазе сгибания и возвращают ее в фазе разгибания. Такие решения позволяют снизить энергопотребление на 10–40 % в зависимости от сценария использования.

Важным направлением является оптимизация приводов. Использование высокоэффективных бесщеточных электродвигателей с КПД до 95 %, редукторов с низким трением и современных гармонических или планетарных передач позволяет существенно уменьшить потери энергии. Квазипассивные приводы, в которых мотор используется только для изменения жесткости или положения, а основную работу выполняют пассивные элементы, позволяют дополнительно снизить энергопотребление. Интеллектуальные алгоритмы управления, отключающие приводы в фазах, где активная поддержка не требуется, а также адаптивное изменение момента в зависимости от нагрузки обеспечивают дополнительную экономию энергии.

Существенный вклад в повышение энергоэффективности вносит биомеханическая синхронизация. Если экзоскелет не совпадает с естественной кинематикой человека, устройство тратит энергию на компенсацию ошибок и сопротивление движению пользователя. Для решения этой проблемы применяются модели предсказания движения, основанные на нейросетях и фильтре Калмана, используются электромиографические сигналы для раннего определения намерений, применяяются оптимизация траекторий под конкретного пользователя и онлайн-калибровка, позволяющая системе подстраиваться под походку в реальном времени. Такие методы позволяют снизить энергозатраты на 15–25 %.

Снижение массы конструкции также является важным фактором, поскольку каждый лишний килограмм увеличивает энергопотребление на 3–7 %. Для уменьшения массы применяются титановые сплавы, углепластики, алюминиевые сплавы серии 7000 и полиамидные композиты. Использование легких материалов позволяет уменьшить массу экзоскелета на 20–30 %, что напрямую увеличивает время автономной работы.

Перспективным направлением является создание экзоскелетов с частичной энергетической автономией. Исследования показывают, что энергия, генерируемая при ходьбе, может достигать 5–20 Вт, термоэлектрические генераторы способны обеспечивать 1–3 Вт за счет тепла тела, а пьезоэлементы и микро-ГТГ дают дополнительные доли ватта. Хотя полной автономии достичь пока невозможно, гибридные схемы питания позволяют продлить время работы экзоскелета на 20–40 %.

Анализ патентов и научных работ подтверждает эффективность перечисленных подходов. В патенте US20160213496 описана система рекуперации энергии в коленном суставе с использованием мотор-генератора и интеллектуального управления фазами шага. Исследования, опубликованные в Frontiers in Robotics & AI, демонстрируют, что оптимизация биомеханической синхронизации снижает энергопотребление на 18–27 %. В работах ASME Journal of Mechanisms and Robotics представлены решения для плечевых экзоскелетов, способных генерировать до 12 Вт при опускании руки. Публикации IEEE показывают, что использование квази-пассивных приводов и адаптивного управления позволяет снизить энергозатраты на 30–40 %.

Максимальный эффект достигается при интеграции нескольких подходов: рекуперации энергии в ключевых суставах, применения квази-пассивных приводов, использования легких материалов, внедрения биомеханической синхронизации на основе EMG и IMU, интеллектуального управления с отключением приводов в пассивных фазах и гибридных источников питания. Комплексное применение этих методов позволяет увеличить время автономной работы экзоскелета в полтора–два с половиной раза.

Таким образом, повышение энергоэффективности экзоскелетов является многокомпонентной задачей, включающей оптимизацию приводов, снижение массы конструкции, рекуперацию энергии и интеллектуальное управление. Современные исследования подтверждают, что сочетание этих методов делает экзоскелеты более автономными, легкими и удобными, что существенно расширяет возможности их применения в реальных условиях. Перспективы дальнейшего развития связаны с созданием полностью энергоавтономных систем, способных эффективно использовать биомеханическую энергию человека и адаптироваться к индивидуальным особенностям пользователя.

Литература

1. Герасимов, М. Д. Анализ методов рекуперации энергии в человеко-машинных системах / М. Д. Герасимов, И. В. Киселев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – № 12. – С. 22–31.
2. Панов, А. И. Современные подходы к проектированию активных экзоскелетов / А. И. Панов, К. С. Яковлев // Труды МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2023. – № 4. – С. 15–29.
3. Киселев, А. В. Биомеханические модели для управления экзоскелетами нижних конечностей / А. В. Киселев, В. А. Лапшин // Вестник МГТУ имени Баумана. Серия Приборостроение. – 2020. – № 5. – С. 67–78.
4. Селиванов, А. А. Использование легких композиционных материалов в конструкциях экзоскелетов / А. А. Селиванов, П. В. Кузнецов // Полимерные материалы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 112–121.
5. Фролов, А. А. Нейроуправление и биомеханическая синхронизация в роботизированных ортезах / А. А. Фролов, А. Ю. Григорьев // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 45–59.
6. Лебедев, М. А. Нейроинтерфейсы и управление экзоскелетами: состояние и перспективы / М. А. Лебедев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2020. – № 4. – С. 3–15.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «АНИМАТРОННАЯ СИСТЕМА»

А. А. Белоусов

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

Научный руководитель В. А. Савельев

Рассмотрена разработка и реализация лабораторного стенда «Аниматронная система», предназначенного для демонстрации интеграции компьютерного зрения, микроконтроллерного управления и мехатронных исполнительных механизмов. Описана архитектура системы, включающая персональный компьютер, микроконтроллер Arduino, модуль PCA9685 и сервоприводы. Приведены методы обработки видеопотока с использованием MediaPipe FaceMesh, алгоритмы фильтрации и нормализации данных, а также принципы управления сервоприводами. Представлены результаты, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: аниматроника, микроконтроллер, MediaPipe, FaceMesh, сервопривод, фильтрация, UART.

Основной целью является создание аппаратно-программного комплекса, способного отслеживать положение головы пользователя с помощью веб-камеры и воспроизводить соответствующие движения механической модели головы с использованием сервоприводов.

Методика. Система построена по модульному принципу. На ПК реализована обработка видеопотока с использованием библиотеки MediaPipe и модели FaceMesh, извлекающей 468 ключевых точек лица. На основе координат точек рассчитываются углы поворота головы по осям yaw и pitch. Эти углы нормализуются и передаются по UART на микроконтроллер Arduino. На Arduino реализованы алгоритмы цифровой фильтрации, включая пороговую фильтрацию (deadband), экспоненциальное сглаживание и ограничение скорости изменения угла. Итоговые значения передаются на модуль PCA9685, который формирует ШИМ-сигналы для управления сервоприводами.

На стороне ПК применяется python библиотека MediaPipe версии 0.10.33, включающая модель FaceMesh, которая извлекает 468 ключевых точек лица. На основе координат этих точек вычисляются углы поворота головы по осям yaw и pitch. Для повышения устойчивости работы выполняется нормализация координат, ограничение диапазонов и подавление шумов.

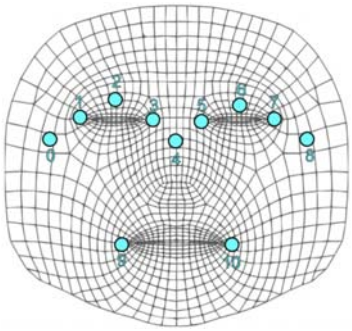


Рис. 1. Метки для отслеживания положения лица

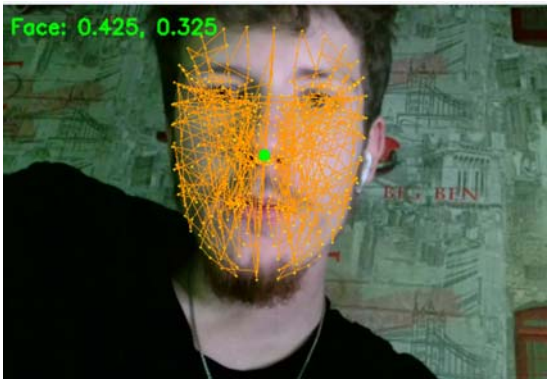


Рис. 2. Метки для отслеживания положения лица с выводом координат

Метки для отслеживания положения лица (рис. 1, 2) показывают, как Media pipe ставит точки для четкого позиционирования лица для последующего отслеживания. Полученные значения передаются на Arduino Uno по интерфейсу UART в виде компактного пакета данных, что минимизирует задержку передачи. После получения данных микроконтроллер выполняет их дополнительную обработку. Реализована пороговая фильтрация deadband, позволяющая подавлять микроколебания, возникающие из-за неточностей трекинга. Далее применяется экспоненциальное сглаживание, описываемое выражением:

$$S_t = ax + (1-a)S_{t-1},$$

где S_t – экспоненциальное среднее (прогноз) для текущего момента времени; a – коэффициент сглаживания (обычно от 0,1 до 0,4), определяющий вес последнего фактического значения; x – фактическое наблюдение в момент времени; S_{t-1} – сглаженное значение (прогноз) за предыдущий период.

После фильтрации данные преобразуются в значения ШИМ-сигналов, которые передаются на модуль PCA9685. Модуль PCA9685 обеспечивает шестнадцать независимых каналов ШИМ, что позволяет подключить шесть сервоприводов используемых в механической модели головы. Два сервопривода отвечают за поворот головы по горизонтали и вертикали, а остальные обеспечивают движение век или дополнительных элементов конструкции. Питание сервоприводов подается от вывода 5V Arduino Uno, что является допустимым, но не рекомендованным решением при высоких нагрузках. Тем не менее в рамках лабораторного стенда такая конфигурация обеспечивает стабильную работу.

Аниматронная система с модулем PCA9685 и Arduino Uno представлена на рис. 3.

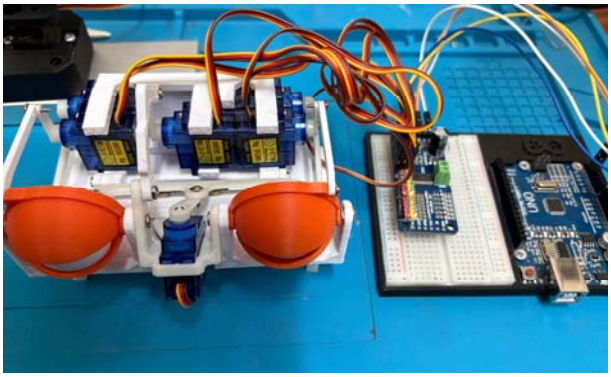


Рис. 3. Аниматронная система
с модулем PCA9685 и Arduino Uno

В качестве ИО используются сервоприводы серии SG90, Канал 0 отвечает за движение глаз по оси *x*; канал 1 отвечает за движение по оси *y*; каналы 2–5 используются для движения «веками» аниматронной системы.

Особое внимание уделяется передаче данных между ПК и микроконтроллером. Использование UART-интерфейса обеспечивает простоту реализации, однако накладывает ограничения на скорость обмена. В условиях реального времени важно минимизировать размер передаваемых пакетов и избегать избыточных данных. В текущей реализации передаются только нормализованные координаты центра лица, что позволяет достичь высокой частоты обновления. При необходимости система может быть расширена для передачи дополнительных параметров, таких как углы наклона головы или степень открытия глаз, однако это потребует оптимизации протокола обмена.

С точки зрения аппаратной части стенда важным аспектом является организация питания. Несмотря на то, что сервоприводы SG90 могут работать от вывода 5V Arduino Uno, подобная конфигурация не является оптимальной. При одновременной работе нескольких приводов возникают скачки потребляемого тока, которые могут приводить к просадкам напряжения и нестабильной работе микроконтроллера.

Проведенные испытания показали, что система работает устойчиво, а задержка реакции составляет менее 50 мс. Механическая модель плавно повторяет движения пользователя, реализованные алгоритмы фильтрации эффективно устраняют дрожание и обеспечивают стабильность.

Литература

1. Google AI. MediaPipe Face Landmarker // Google Developers. – URL: https://developers.google.com/mediapipe (date of access: 05.03.2026).
2. Официальная документация Arduino // Arduino.cc. URL: https://www.arduino.cc/ (дата обращения: 22.03.2026).
3. NXP Semiconductors. PCA9685 – 16-Channel PWM Driver Datasheet // NXP.com. – URL: https://www.nxp.com/ (date of access: 27.03.2026).
4. PySerial. Python Serial Port Extension Documentation [Электронный ресурс].

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВОЗА

Яо Бинь

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, Шаньдунский технологический институт Хуаюй, г. Дэчжоу, Китайская Народная Республика

Научный руководитель М. Н. Погуляев

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

Рассмотрена проблема высоких энергетических затрат при проведении нагрузочных испытаний дизель-генераторных установок тепловозов. Традиционные методы испытаний сопровождаются значительным рассеянием электрической энергии в виде тепла на нагрузочных реостатах, что снижает общую энергоэффективность испытательного процесса. Предложено энергосберегающее устройство, обеспечивающее рациональное использование вырабатываемой электроэнергии в ходе испытаний. Конструктивное решение основано на преобразовании и перераспределении электрической мощности с возможностью ее полезного использования во внутренних технологических цепях предприятия либо возврата в сеть. Проведен анализ принципа действия устройства, определены его основные функциональные узлы и оценен ожидаемый экономический эффект от внедрения. Результаты исследования показывают, что применение предлагаемого устройства позволяет сократить непроизводительные потери энергии, повысить энергетическую эффективность испытаний и снизить эксплуатационные затраты локомотивного хозяйства.

Ключевые слова: тепловоз, дизель-генераторная установка, нагрузочные испытания, энергосбережение, электрическая нагрузка, реостат, преобразователь энергии.

Дизель-генераторные установки (ДГУ) локомотивов являются основным источником энергии, от их надежности зависит безопасность и эффективность движения поездов.

Нагрузочные испытания дизель-генераторных установок тепловозов являются важным этапом технического обслуживания, ремонта и послеремонтной диагностики тягового подвижного состава. Их проведение позволяет оценить работоспособность си-

ловой установки, проверить стабильность выходных параметров генератора, а также определить соответствие фактических характеристик нормативным требованиям.

Несмотря на техническую необходимость таких испытаний, традиционные методы их проведения характеризуются низкой энергетической эффективностью. В большинстве случаев электрическая энергия, вырабатываемая генератором в процессе испытаний, передается на балластную нагрузку и преобразуется в тепловую энергию в нагрузочных реостатах [1]. Данная энергия не используется повторно, что приводит к дополнительным затратам и снижает общую эффективность эксплуатации испытательного оборудования.

В современных условиях повышения требований к энергосбережению и рациональному использованию ресурсов актуальной задачей является разработка технических решений, позволяющих использовать вырабатываемую при испытаниях энергию с минимальными потерями.

Целью работы является разработка и обоснование применения энергосберегающего устройства для нагрузочных испытаний дизель-генераторной установки тепловоза, обеспечивающего снижение потерь электрической энергии и повышение энергетической эффективности испытательного процесса.

В работе использованы методы технического анализа, структурно-функционального моделирования, инженерной оценки энергетических потерь и сравнительного анализа традиционной и усовершенствованной схем испытаний [2].

Предлагаемое энергосберегающее устройство включает следующие основные элементы: блок подключения к выходным цепям дизель-генераторной установки; систему регулирования испытательной нагрузки; блок контроля и измерения электрических параметров; узел передачи энергии на полезную нагрузку либо в сеть предприятия (рис. 1).

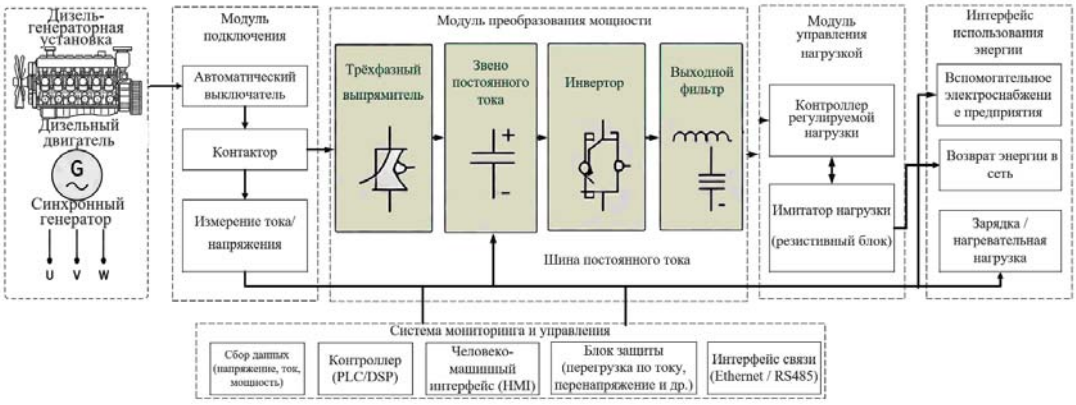


Рис. 1. Структурная схема энергосберегающего устройства

Принцип работы устройства заключается в следующем. В процессе испытаний электрическая энергия, вырабатываемая дизель-генераторной установкой тепловоза, направляется не только на моделирование требуемой испытательной нагрузки, но и на полезное использование. В зависимости от технических условий предприятия эта энергия может быть использована для питания вспомогательных потребителей, систем нагрева, зарядных установок, осветительных и технологических сетей либо возвращена в локальную электрическую сеть через согласующее преобразовательное оборудование.

Коэффициент полезного использования вырабатываемой энергии может быть определен по формуле

$$\eta = \frac{W_{\text{полез}}}{W_{\text{общ}}} 100\ \%,$$

где $W_{\text{полез}}$ – полезно использованная энергия, кВт · ч; $W_{\text{общ}}$ – общая энергия, выработанная дизель-генераторной установкой в процессе испытаний, кВт · ч.

При традиционной схеме испытаний величина $W_{\text{полез}}$ близка к нулю, так как почти вся выработанная энергия расходуется на нагрев нагрузочных элементов. При использовании предлагаемого устройства значительная часть этой энергии может быть возвращена в полезный оборот.

Для оценки возможного энергетического эффекта рассмотрим следующий пример. Предположим, что в ходе нагрузочного испытания дизель-генераторная установка тепловоза работает с активной мощностью 300 кВт в течение 2 ч. Тогда общее количество выработанной энергии составит

$$W = Pt = 300 \cdot 2 = 600\ \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

При традиционной схеме проведения испытаний практически вся эта энергия теряется в виде тепла. Если принять, что предлагаемое энергосберегающее устройство обеспечивает полезное использование 65 % вырабатываемой энергии, то

$$W_{\text{полез}} = 600 \cdot 0{,}65 = 390\ \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следовательно, потенциальная экономия электроэнергии за одно испытание составит 390 кВт · ч. Если в течение года на предприятии выполняется, например, 120 аналогичных испытаний, то суммарный годовой энергетический эффект может достигать

$$W_{\text{общ}} = 390 \cdot 120 = 46800\ \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

Полученные расчеты подтверждают, что внедрение энергосберегающего устройства является особенно целесообразным на локомотиворемонтных и сервисных предприятиях с регулярным проведением нагрузочных испытаний.

Таким образом, предлагаемое устройство не только обеспечивает выполнение необходимых диагностических и контрольных операций, но и позволяет повысить ресурсную и экономическую эффективность всего процесса испытаний.

В результате проведенного исследования установлено, что традиционная схема нагрузочных испытаний дизель-генераторной установки тепловоза сопровождается значительными непроизводительными потерями электрической энергии. Разработанное энергосберегающее устройство позволяет частично использовать вырабатываемую энергию в полезных целях, тем самым повышая общую энергетическую эффективность испытательного процесса.

Применение данного решения способствует снижению эксплуатационных затрат, уменьшению тепловой нагрузки на испытательный участок и более рациональному использованию энергетических ресурсов локомотивного хозяйства. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка опытного образца устройства и проведение его экспериментальной апробации в условиях локомотивного депо.

Литература

1. Погуляев, М. Н. Энергосберегающее устройство нагружения резервных электрогенераторов на основе статических преобразователей / М. Н. Погуляев // Вестник Гомельмкого государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – № 3 (90). – С. 96–103.
2. Обзор современных проблем и перспективных технологий повышения энергоэффективности, безопасности и устойчивости железнодорожного транспорта / З. И. Кляич, Д. М. Павкович, М. А. Ципек, М. К. Никшич // Future Internet. – 2023. – Т. 15. – С. 347.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ПУЧКОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

И. С. Шашок

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

Научный руководитель П. С. Шаповалов

Рассмотрена задача вывода нелинейной системы уравнений Шредингера для описания взаимодействия двух некогерентных пучков в среде с керровской нелинейностью в пренебрежении интерференции между ними.

Ключевые слова: керровская нелинейность, нелинейное взаимодействие, некогерентные пучки, нелинейная фокусировка.

В последнее время развитие электроники требует создания электронных устройств на базе оптических элементов, которые обладают значительным быстродействием и большой пропускной способностью. Уже подавляющий объем информации передается с помощью различных типов световодов. Обработка информации также производится с помощью оптоэлектронных устройств, например, акустооптических преобразователей. Также широко исследуется применение нелинейных оптических явлений в оптоэлектронных устройствах. Наиболее перспективными являются устройства на основе керровской нелинейности. В таких средах показатель преломления среды (n) зависит от интенсивности света [1]:

$$n = n_0(1+\beta I)\,. \qquad (1)$$

Здесь n_0 – линейная часть показателя преломления; β – коэффициент нелинейности; I – интенсивность света. Подробно исследовано распространение круговых лазерных пучков в таких средах. Также подробно исследовано распространение эллиптических и вращающихся эллиптических пучков в нелинейных средах типа (1). Но остается не исследованным распространение в нелинейных средах двух световых пучков.

Теоретическое исследование явлений предполагает решение дифференциальных уравнений. Решение можно произвести аналитически, т. е. найти решение в виде аналитической функции. Это позволяет подробно исследовать поведение световых пучков в нелинейной среде, найти критическую мощность самофокусировки, ее зависимость от начальных параметров пучка, а также изменение формы световых пучков при распространении в нелинейной среде. Численное решение можно произвести в сложных случаях, когда аналитические методы нельзя применить. Но численные решения обладают существенным недостатком: они позволяют найти поведение в частном случаи, но они не обладают свойством общности. Для нелинейных явлений аналитические методы в массе своей – приближенные, и численные методы позволяют контролировать точность аналитических исследований.

При распространении в линейной среде когерентных пучков происходит перераспределения световой энергии и наблюдается интерференционная картина в виде светлых и темных пятен. Если среда нелинейная, например, среда с керровской нелинейностью, т. е. зависимостью показателя преломления от интенсивности света (1), то интерференционные явления усложняются, и наблюдается кроме пространственного перераспределения интенсивности света перекачка энергии между пучками, а также возможна, если выполняются условия фазового синхронизма, генерация различных гармоник. Нелинейные интерференционные явления достаточно сложны и даже в простейших случаях не позволяют произвести аналитические исследования.

Более простые явления наблюдается при распространении некогерентных пучков в нелинейных средах. В этом случае мы пренебрегаем интерференционными членами, что упрощает дифференциальные уравнения и позволит использовать аналитические методы для исследования. Теоретическое исследование явлений предполагает решение дифференциальных уравнений. Решение можно произвести аналитически, т. е. найти решение в виде аналитической функции.

Если пучки получены от различных источников, например, лазеров, и если они одного типа, то полученные от них пучки будут взаимно некогерентными. Также взаимно некогерентными будут пучки, полученные при разделении одного пучка, но их разность хода больше длины когерентности, т. е. взаимодействуют пучки от различных цугов, и при их сложении интерференционные явления не наблюдаются. Обычно длина когерентности лазерного излучения зависит от длины резонатора лазера. Чем он больше, тем больше длина когерентности лазерного излучения.

Для описания распространения лазерных пучков в нелинейных средах используем нелинейное уравнение Шредингера [2]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}-2ik_0\frac{\partial U}{\partial z}+k_0^2\beta\left|U\right|^2U=0, \tag{2}$$

где U – компонента напряженности электромагнитного поля, $\left|U\right|^2=UU^*$ – квадрат модуля комплексной функции; U^* – комплексно сопряженная функция; x, y – поперечные декартовые координаты; z – продольная декартовая координата, координата вдоль распространения световых пучков. Пусть в направлении z распространяются два некогерентных лазерных пучка:

$$U=U_1+U_2. \tag{3}$$

При подстановке (3) в (2) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}-2ik_0\frac{\partial U_1}{\partial z}+\frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2}-2ik_0\frac{\partial U_2}{\partial z}+$$

$$+k_0^2\beta\left\{\left|U_1\right|^2U_1+2\left|U_1\right|^2U_2+U_1U_2^*U_1+U_2U_1^*U_2+2\left|U_2\right|^2U_1+2\left|U_2\right|^2U_1\right\}=0. \tag{4}$$

Учитывая, что пучки некогерентные, мы можем пренебречь интерференционными членами $U_1U_2^*U_1+U_2U_1^*U_2$, которые отвечают за перекачку световой энергии между пучками. Так как пучки некогерентные, то функции, описывающие их, линейно независимы, поэтому мы можем уравнение (4) разбить на систему двух линейно независимых уравнений вида:

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}-2ik_0\frac{\partial U_1}{\partial z}+k_0^2\beta\left(|U_1|^2+2|U_2|^2\right)U_1=0; \quad (5а)$$

$$\frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2}-2ik_0\frac{\partial U_2}{\partial z}+k_0^2\beta\left(|U_2|^2+2|U_1|^2\right)U_2=0. \quad (5б)$$

Из уравнений системы (5) следует влияние сопутствующего пучка на нелинейные эффекты фокусировки в два раза больше, чем влияние основного пучка на самофокусировку. Это является довольно странным и может приводить к новым нелинейным явлением.

Исследование систему уравнений (5) будет нами продолжаться. Одним из путей может быть поиск решения уравнения в приближении сохранения пучков гауссовой формы, где параметр U будет искаться в виде круговой гауссовой функции:

$$U_i=\exp\left\{-P+iQ+\frac{x^2+y^2}{w^2}-ik_0\frac{x^2+y^2}{R}\right\}. \quad (6)$$

Здесь параметры P, Q характеризуют изменение интенсивности и набег фаз на оси пучка; w – изменение размера светового пятна пучка; R – кривизна фазовой поверхности.

Литература

1. Бломберген, Н. Нелинейная оптика / Н. Бломберген. – М. : Мир, 1966. 256 с.
2. Гончаренко, А. М. К теории рспространения вращающегося гауссова пучка света в нелинейной среде / А. М. Гончаренко, П. С. Шаповалов // Доклады АН БССР. – 1988. – Т. 32, № 12. – С. 1073–1076.

УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ В УСТРОЙСТВАХ НАГРУЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Цзя Шусян

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, Шаньдунский технологический институт Хуаной, г. Дэчжоу, Китайская Народная Республика

Научный руководитель М. Н. Погуляев

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

Предложена схема устройства нагружения синхронных генераторов резервных источников питания с использованием управляемых полупроводниковых выпрямителей. Показано, что такое устройство является энергосберегающим и позволяет регулировать коэффициент мощности и величину нагрузки генератора.

Ключевые слова: синхронный генератор, резервный источник, устройство нагружения, управляемый выпрямитель, ведомый инвертор.

Синхронный генератор (СГ) является одним из основных элементов дизель-генераторных установок (ДГУ), которые используются в качестве резервных источников питания. Такие установки обеспечивают функционирование наиболее ответственных потребителей при пропадании центрального электроснабжения. Однако необходимо быть уверенным в том, что ДГУ, которые обычно длительно находятся в неактивном состоянии (в простое), безотказно сработают при аварийных ситуациях и обеспечат электроснабжение объекта. Чтобы гарантировать, что генераторные установки функционируют должным образом, необходимо регулярно проводить их техническое обслуживание и испытание под нагрузкой. Устройство нагружения (УН) должно создавать нагрузку от минимальной, равной 10 %, до максимальной, равной 110 % номинальной мощности генератора при коэффициенте мощности 0,8, с возможностью его регулирования [1]. Известные способы нагружения ДГУ не в полной мере отвечают требованиям стандартов и технических условий. Достижения современной электроники и силовой преобразовательной техники позволяют найти новые подходы к решению этой проблемы.

Цель работы – исследование нагружающего устройства синхронных генераторов, выполненного на управляемых выпрямителях. Функциональная схема такого НУ представлена на рис. 1. В ее состав входят: СУиР – система управления и регулирования; Д – двигатель; Г – нагружае-мый синхронный генератор; УВП – управляемый выпрямитель; ИВ – инвертор, ведомый сетью; *L* – реактор; Тр – трансформатор согласования.

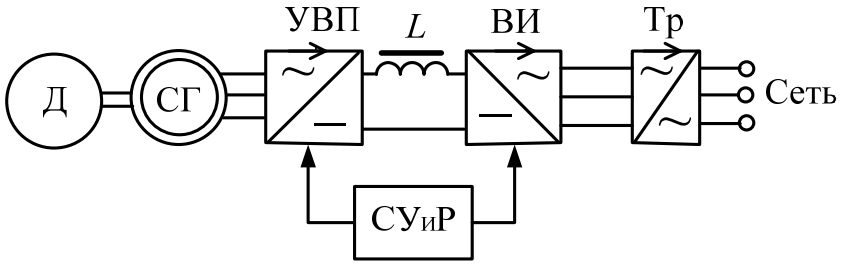


Рис. 1. Функциональная схема устройства нагружения

В управляемых выпрямителях при задержке подачи управляющего импульсов на тиристоры на угол α первая гармоника тока I_1 отстает по фазе от основной гармоники напряжения на угол φ [2]:

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2},$$

где γ – угол коммутации вентилей.

Коэффициент мощности нагрузки генератора $K_{\text{м}}$

$$K_{\text{м}} \approx \cos\varphi = \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right). \qquad (1)$$

Отсюда следует, что регулированием угла α управляемого выпрямителя можно задавать коэффициент мощности генератора.

Работа данной схемы нагружателя была проверена на имитационной модели, созданной в программе Matlab и его приложениях. В модели коэффициент мощности рассчитывается по формуле

$$K_{\text{м}} = \frac{P}{S}, \tag{2}$$

где P, S – активная и полная мощности генератора соответственно

Результаты расчетов по формулам (1) и (2) оказались достаточно близкими, что свидетельствует о возможности применения предложенной схемной реализации НУ для регулирования коэффициента мощности.

В ходе исследования также было установлено, что, управляя ведомым инвертором, можно задавать необходимый ток нагрузки генератора, а само устройство является энергосберегающим, рекуперируя в сеть до 80 % вырабатываемой энергии. Таким образом, устройства нагружения на основе управляемых полупроводниковых выпрямителей могут применяться для испытания синхронных генераторов под нагрузкой резервных источников питания.

Литература

1. Энергоэффективные испытательные стенды / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев, В. А. Савельев, В. В. Тодарев // Энергоэффективность. – 2018. – № 9. – С. 26-30.
2. Погуляев, М. Н. Энергосберегающее устройство нагружения резервных электрогенераторов на основе статических преобразователей / М. Н. Погуляев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – № 3 (90). – С. 96–103.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК НА КРУПНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ И МОРСКИХ СУДАХ: КРАТКИЙ ОБЗОР

Ли Дэцян

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

Научный руководитель В. П. Кудин

Многоэлементные антенные решетки на борту крупногабаритных летательных аппаратов и морских судов работают в условиях сложного электромагнитного взаимодействия с крупной проводящей платформой. Это приводит к постановке граничных задач электродинамики, при решении которых применяются дифференциальные, интегральные, высокочастотные, модальные и гибридные методы. Кратко рассмотрены возможности этих подходов при анализе решеток на электрически больших носителях. Особое внимание уделено модальным и гибридным схемам как наиболее перспективным для сочетания приемлемой точности и умеренной вычислительной трудоемкости.

Ключевые слова: многоэлементные антенные решетки, дифференциальные методы, метод моментов, высокочастотные методы, метод характеристических мод, гибридные методы.

Многоэлементные антенные решетки на крупных летательных аппаратах и морских судах должны обеспечивать направленное излучение и устойчивое сканирование луча в условиях сильного влияния проводящего корпуса, размеры которого значительно превышают длину волны. В таких задачах необходимо учитывать взаимную связь эле-

ментов, переотражения от поверхности носителя и дифракцию на его конструктивных элементах, поэтому анализ опирается на методы вычислительной электродинамики [1]. В современной практике для этого используются дифференциальные и интегральные методы, метод моментов, высокочастотные асимптотические схемы, а также гибридные и модальные подходы [1, 2]. Среди них метод характеристических мод и гибридные схемы представляют наибольший интерес для анализа и последующей оптимизации решеток на электрически больших платформах [2, 3].

Основные классы методов решения граничных задач электродинамики. При анализе многоэлементных антенных решеток на крупных летательных аппаратах и морских судах применяются как строгие численные, так и приближенные методы вычислительной электродинамики. К первой группе относятся дифференциальные методы и методы интегральных уравнений, включая метод моментов. Они позволяют подробно описывать распределение полей, токи на проводящих поверхностях и взаимную связь элементов решетки, что особенно важно в локальной области вокруг антенного модуля. Однако при переходе к расчету всей платформы их применение ограничивается быстрым ростом числа неизвестных и вычислительных затрат [1].

Для электрически больших носителей все более важную роль играют высокочастотные, модальные и гибридные подходы. Высокочастотные методы позволяют быстрее учитывать влияние корпуса, а метод характеристических мод дает физически наглядное представление о вкладе платформенных и антенных мод в формирование диаграммы направленности. Наиболее перспективными для многомасштабных задач являются гибридные схемы, в которых строгий расчет вблизи решетки сочетается с приближенным описанием удаленных участков корпуса. Такое сочетание делает возможным компромисс между точностью и вычислительной трудоемкостью, и поэтому рассматривается как основа дальнейшего анализа и оптимизации решеток на крупных носителях [3].

Применимость методов к анализу многоэлементных антенных решеток. Рассмотрим особенности задач для крупных летательных аппаратов и морских судов.

Антенные решетки на крупных летательных аппаратах и морских судах работают в условиях сильного влияния проводящего корпуса, плотной компоновки элементов и большого электрического размера платформы. В таких задачах необходимо одновременно учитывать взаимную связь излучателей, переотражения от поверхности носителя и дифракцию на его конструктивных элементах [1, 4]. Дифференциальные и интегральные методы обеспечивают высокую точность в локальной области вокруг решетки, однако при расчете всей платформы их применение быстро становится вычислительно затратным [5–7]. Поэтому при анализе крупных носителей все большее значение приобретают высокочастотные, модальные и гибридные подходы, позволяющие учитывать влияние корпуса при более умеренных ресурсах [8].

Сравнительная оценка и рекомендации к выбору. Выбор метода для анализа многоэлементных решеток на крупных носителях определяется требуемой точностью, уровнем учета взаимной связи элементов и допустимой вычислительной трудоемкостью [6]. Строгие полноволновые методы предпочтительны для локальных и эталонных расчетов, высокочастотные методы удобны для быстрого учета влияния всей платформы, а модальные и гибридные схемы наиболее полезны в задачах оптимизации и многомасштабного моделирования [2, 3, 8–13]. Сопоставление их возможностей приведено в таблице.

Сравнительная характеристика основных классов методов для анализа решеток на крупных носителях

Класс методов	Сильные стороны в задачах решеток	Ограничения и типичные задачи
Дифференциальные (МКЭ, FDTD)	Точное поле в локальной области вокруг решетки	Слишком большой объем при моделировании всего корпуса
Методы интегральных уравнений и МоМ	Точные токи и взаимная связь элементов	Плохая масштабируемость по размеру платформы
Высокочастотные асимптотические	Быстрый учет влияния большого корпуса	Приближение вблизи источников и в сложных областях
Модальные и гибридные	Анализ вкладов мод платформы и решетки, баланс затрат	Требуется полноволновая база и настрой-ка гибрида

Примечание. Составлена по материалам работ [1–13].

В заключение можно отметить, что анализ многоэлементных антенных решеток на крупных летательных аппаратах и морских судах требует сочетания нескольких классов методов вычислительной электродинамики, поскольку ни один из них не является универсальным для всех масштабов и условий расчета. Строгие дифференциальные и интегральные методы наиболее полезны в локальных областях, где требуется высокая точность описания поля и взаимной связи элементов, тогда как для электрически больших платформ более практичными оказываются высокочастотные, модальные и гибридные подходы. Наибольший интерес для дальнейших исследований представляют гибридные схемы, поскольку именно они позволяют совместить приемлемую точность с допустимыми вычислительными затратами при анализе и оптимизации решеток на крупных носителях.

Литература

1. Sumithra, P. Review on computational electromagnetics / P. Sumithra, D. Thiripurasundari // Advanced Electromagnetics. – 2017, N 6 (1). – P. 42–55.
2. Medgyesi-Mitschang, L. N. Hybrid methods in computational electromagnetics: A review / L. N. Medgyesi-Mitschang, D. S. Wang // Computer Physics Communications. – 1991. – N 68 (1–3). – P. 76–94.
3. A review of antenna analysis using characteristic modes / B. B. Q. Elias, P. J. Soh, A. A. Al-Hadi [et al.] // Ieee Access. – 2021. – N 9. – P. 98833–98862.
4. Augustyniak, M. Finite element method applied in electromagnetic NDTE: A review / M. Augustyniak, Z. Usarek // Journal of Nondestructive Evaluation, – 2016. – N 35 (3). – 39 p.
5. Finite-difference time-domain methods / F. L. Teixeira, C. Sarris, Y. Zhang [et al.] // Nature Reviews Methods Primers. – 2023. – N 3 (1). – 75 p.
6. Mavrikakis, P. S. Surface Integral Equations in Computational Electromagnetics: A Comprehensive Overview of Theory, Formulations, Discretization Schemes and Implementations / P. S. Mavrikakis, O. J. F. Martin // Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES). – 2025. – P. 279–301.
7. Method of moments based on equivalent periodic problem and FFT with NURBS surfaces for analysis of multilayer periodic structures / R. Florencio, Á. Somolinos, I. González [et al.] // Electronics. – 2020. – N 9 (2). – 234 p.
8. Wu, Y. M. The modern high frequency methods for solving electromagnetic scattering problems / Y. M. Wu, W. C. Chew // Progress In Electromagnetics Research. – 2016. – N 156. – P. 63–82.
9. Physical optics framework for electromagnetic scattering from electrically large targets coated with a uniaxial electric anisotropic medium based on point-source excitation / J. J. He, S. Y. He, G. Q. Zhu [et al.] // Optics Express. – 2021. – N 29 (21). – P. 33642–33664.

10. Lau, B. K. Characteristic modes: Progress, overview, and emerging topics / B. K. Lau, M. Capek, A. M. Hassan // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2022. – N 64 (2). – P. 14–22.
11. Antenna element design using characteristic mode analysis: Insights and research directions / J. J. Adams, S. Genovesi, B. Yang [et al.] // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2022. – N 64 (2). – P. 32–40.
12. Okan, T. Analysis of antennas around NURBS surfaces by using a hybrid method / T. Okan, N. AKçAM // Radioengineering. – 2018. – N 27 (3).
13. Modeling of Multiscale Wave Interactions Based on an Iterative Scheme of MoM-PO-EPA Algorithm / L. Guo, M. Li, S. Xu [et al.] // Electronics. – 2022. – N 11 (7). – P. 990.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ С СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ СЛЕДОВАНИЯ ЗА ОБЪЕКТОМ

К. А. Головач

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

Научный руководитель В. В. Брель

Рассмотрен вопрос проектирования и реализации автономного колесного робота, способного осуществлять визуальное детектирование и автоматическое сопровождение целевого объекта. Описана двухуровневая архитектура системы, включающая вычислительный модуль на базе Raspberry Pi Zero 2W и программный комплекс на основе библиотеки OpenCV.

Ключевые слова: компьютерное зрение, OpenCV, Raspberry Pi, цветовая сегментация, автосопровождение, ПИД-регулятор.

Навигация и следование за подвижной целью являются фундаментальными задачами современной мобильной робототехники. В отличие от стационарных промышленных манипуляторов, требующих жестко детерминированной среды, мобильные платформы должны обладать адаптивностью к динамическим изменениям окружения. Актуальность работы обусловлена потребностью в бюджетных и эффективных решениях для логистических систем и сервисной робототехники, где робот должен выполнять роль автономного ассистента, следующего за оператором или грузом

Для реализации вычислительной подсистемы выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi Zero 2W. Данный выбор обоснован необходимостью обработки видеопотока в реальном времени при жестких ограничениях на массогабаритные характеристики и энергопотребление платформы.

Исполнительная система представляет собой шасси с дифференциальным приводом. Управление коллекторными двигателями осуществляется посредством широтно импульсной модуляции (ШИМ) через специализированный драйвер. В качестве основного сенсора используется цифровая камера, обеспечивающая получение визуальных данных о пространственном положении цели.

Программная реализация системы распознавания базируется на библиотеке OpenCV. Процесс обработки изображений разделен на несколько этапов:

– предварительная фильтрация – применение медианного фильтра для устранения импульсных шумов в видеопотоке;

– цветовая сегментация – перевод кадра в цветовое пространство HSV (Hue, Saturation, Value), которое менее чувствительно к изменениям освещенности по срав-

нению с RGB. Выделение целевого объекта (кубика) происходит путем наложения бинарной маски по заданным порогам цвета;

– детектирование контуров – поиск связных областей (blobs) и вычисление их геометрических моментов для определения центра масс объекта в пиксельных координатах кадра.

Управление роботом строится на минимизации ошибки рассогласования между текущим и целевым положением объекта.

Направление движения корректируется в зависимости от смещения центра объекта относительно оптической оси камеры. Если объект находится слева от центра кадра, угловая скорость правого колеса увеличивается, обеспечивая поворот.

Расстояние до объекта оценивается на основе площади ограничивающей рамки или вычисления евклидова расстояния в пикселях. Для плавного регулирования линейной скорости применяется ПИД-регулятор, минимизирующий статическую ошибку положения.

Логика управления реализует конечный автомат состояний: «Поиск» (вращение на месте при потере цели), «Преследование» и «Остановка/Безопасный откат» при достижении критической дистанции.

Экспериментальные исследования подтверждают, что интеграция Raspberry Pi и OpenCV позволяет достичь необходимой точности автосопровождения объекта в реальном времени. Реализованная система обеспечивает устойчивое следование за цветным кубиком при скоростях, сопоставимых с пешим движением человека, и сохраняет заданную дистанцию с погрешностью, не превышающей допустимые значения для мобильных платформ данного класса.

В качестве перспектив развития работы рассматривается внедрение алгоритмов глубокого обучения для классификации сложных объектов и использование стереозрения для более точного определения глубины сцены.

Литература

1. Bradski, G. Learning OpenCV / G. Bradski, A. Kaehler. – O'Reilly Media, 2008.
2. URL: https://opencv.org/.
3. URL: https://www.raspberrypi.org/documentation/.

СОЗДАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ САМОДЕЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ МИКРОСХЕМЫ TPA3255 С АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

Д. А. Шабетник

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

Научный руководитель О. И. Проневич

Произведено подключение и усовершенствование усилителя портативной акустической системы. Показаны ключевые условия создания такой акустической системы – это правильный подбор компонентов: усилителя, динамиков, источника питания. Установлено, что при использовании импульсных усилителей класса D в сочетании с грамотно подобранной акустикой и литий-ионным аккумулятором можно создать энергоэффективную, мощную и практичную автономную аудиосистему.

Ключевые слова: импульсный усилитель, bluetooth-антенна, портативная акустическая система, источник питания, динамики, микросхема, литий-ионный аккумулятор.

В последние годы наблюдается устойчивый рост спроса на портативные акустические системы, сочетающие мобильность, автономность и приемлемое качество звучания. Несмотря на очевидные преимущества, портативные системы по-прежнему уступают стационарным по качеству звучания и продолжительности автономной работы. Основным ограничением остается компромисс между мощностью, КПД усилителя и емкостью аккумулятора.

Цель данной работы – проанализировать и модернизировать усилительный тракт автономной акустической системы 2.1 (рис. 1) на базе усилителя XY-AS21HPA с двумя микросхемами класса *D*: TPA3255, оснащенной литий-ионным аккумулятором 25,2 В в пике и дополнительной внешней bluetooth-антенной.

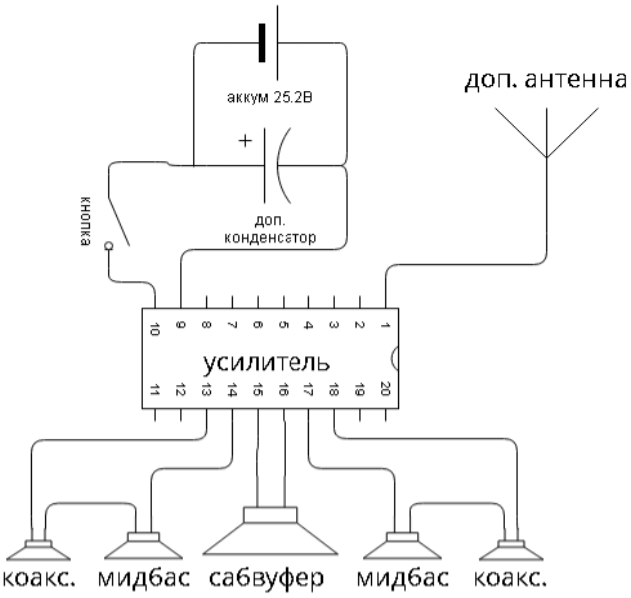


Рис. 1. Простая схема данной колонки

Усилители мощности звука классифицируются по режиму работы выходных каскадов. Для создания данной портативной акустической системы был использован усилитель класса *D* – это импульсный усилитель, работающий по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1]. КПД усилителя мощности достигает 90 % и выше при достаточно низком тепловыделении. В разработке применен модуль XY-AS21HPA на двух микросхемах TPA3255. Основные характеристики TPA3255 включают:

• Напряжение питания: 10–53 В DC.

• КПД: до 90 %.

• THD + N: < 0,01 % (искажение гармоник в звучании).

• SNR: ≈ 111 дБ (чем больше значение, тем меньше помех в звуке, пример – радио).

Модуль обеспечивает трехканальное усиление: два стереоканала и канал сабвуфера.

В акустической системе использовано 5 динамиков: два – низко-средне-частотных, два трехполосных коаксиальных и сабвуфер, все имеют импеданс 4 Ом. Реальная выходная мощность системы при напряжении – 22–24 В составляет примерно 50–60 Вт на стереоканал и 150–170 Вт – на сабвуфер.

Для обеспечения беспроводной связи портативной акустической системы с мобильным телефоном, компьютером, планшетом необходим Bluetooth-тракт и антенная система на частоте 2,402–2,480 ГГц. Для увеличения дальности связи была добавлена внешняя патч-антенна и рассчитана ее оптимальная длина. Расчет длины волны на частоте 2,4 ГГц:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2{,}4 \cdot 10^9} \approx 0{,}125 \text{ м}.$$

Чтобы обеспечить эффективное излучение и согласование, длина внешней антенны определяется по формуле $\lambda / 4 \approx 31{,}25$ мм. Соответственно при добавлении внешней антенны повысили дальность и качество связи, прирост составил 25–30 %, но это лишь примерная оценка, зависящая от условий. В реальности эффективность зависит от условий распространения сигнала, уровня помех и замены антенны на обоих концах линии, обеспечивая фокусировку энергии, а не повышение мощности аппаратного сопряжения.

Питание акустической системы осуществляется литий-ионный аккумулятором конфигурации 6S4P (25,2 В, 6000 мА/ч), который состоит из 24 элементов, соединенных по 6 последовательно и 4 – параллельно, и обеспечивает номинальное напряжение – 22,2–24 В и максимальное – 25,2 В. Энергоемкость данного аккумулятора:

$$E = 25{,}2 \text{ В} \cdot 6 \text{ А/ч} \approx 151{,}2 \text{ Вт/ч}.$$

С учетом потерь ~ 120 Вт/ч.

Время автономной работы самодельной акустической системы рассчитывается по формуле

$$t = \frac{E\eta}{P_{\text{ср}}},$$

где $\eta \approx 0{,}9$ (КПД класса *D*). При средней громкости портативная система проработает 1,44 ч, на максимальной громкости (120 × 0,9)/100 ≈ 1,08 ч ≈ 1 ч 4 мин.

Собранная акустическая система 2.1 имеет массу около 13 кг, КПД усилителя – 90 %; обеспечивает низкое тепловыделение. Установленные в портативной системе сабвуфер JBL Stage 1010 и мидбасовые динамики EDGE EDBPRO совместно с коаксиальными Pioneer TS-G1303i обеспечивают хорошую проработку частотного диапазона. Система обладает высокой удельной мощностью при компактных габаритах, полной автономностью и возможностью модернизации. Общая стоимость комплектующих данного проекта при самостоятельной сборке выгодно отличается от решений, которые можно приобрести готовыми.

Применение современных усилителей класса *D* (TPA3255) в сочетании с грамотно подобранной акустикой и литий-ионным аккумулятором позволяет создать энергоэффективную, мощную и практичную автономную аудиосистему. Такие устройства востребованы в повседневном быту, во время отдыха на природе, в детских и гостевых комнатах, а также как дополнение к стационарным системам (импровизированное 5.1). Полученная конструкция подтверждает перспективность импульсных усилителей для мобильных решений.

Литература

1. Классы усилителей звука. – URL: https://globaltuning.com/blog/sovety-pokupatelyam/klassy-usiliteley-zvuka/ (дата обращения: 03.04.2026).

СПЕКТРАЛЬНЫ АНАЛІЗ І ВЕРЫФІКАЦЫЯ ІНТАНАЦЫЙНЫХ КОНТУРАЎ ПРЫ АПАРАТНА-ПРАГРАМНАЙ РЭАЛІЗАЦЫІ СІНТЭЗАТАРА МАЎЛЕННЯ

С. Ю. Крышнеў

Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Францыска Скарыны», Рэспубліка Беларусь

І. У. Блыхін

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

Навуковыя кіраўнікі: Ю. В. Крышнеў, М. У. Буракова

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

Разгледжаны метады ацэнкі якасці сінтэзаванага маўленчага сігналу на аснове спектральнага аналізу (STFT, мел-спектраграма, метрыка MCD, LPC-спектр). Апісана апаратна-праграмная рэалізацыя інтэрфейсу гукавой карты і прыведзены вынікі верыфікацыі суперсегментнай (прасадычнай) мадуляцыі шляхам параўнання асцылаграм і інтанаграм для розных тыпаў інтанацыйных канструкцый.

Ключавыя словы: сінтэз маўлення, спектральны аналіз, STFT, MCD, LPC-спектр, верыфікацыя, інтанацыйныя канструкцыі, FPGA.

Кантроль якасці сінтэзаванага маўленчага сігналу з'яўляецца неабходным этапам распрацоўкі любой сістэмы «тэкст-у-маўленне»: без аб'ектыўных крытэрыяў ацэнкі немагчыма пацвердзіць, што рэалізаваны алгарытм сапраўды забяспечвае натуральнае гучанне гаворкі і карэктную перадачу яе інтанацыйнага малюнку. У сучасных даследаваннях для гэтага выкарыстоўваюцца як спектральныя метады аналізу сігналу (кароткачасовае пераўтварэнне Фур'е, мел-спектраграмы, метрыка MCD), так і метады візуальнай верыфікацыі прасадычных параметраў – параўнанне асцылаграм і інтанаграм эталонных і сінтэзаваных выказванняў.

У праекце, матэрыялы якога пакладзены ў аснову дадзенага даклада, распрацавана сістэма сінтэзу маўленчых акустычных сігналаў з улікам інтанацыі выказвання; мэтай работы з'яўляецца распрацоўка праграмна-апаратнага комплексу з магчымасцю дынамічнага кіравання інтанацыйным малюнкам. У дакладзе раз-гледжаны этапы спектральнага аналізу сінтэзаванага сігналу, асноўныя рашэнні апаратна-праграмнай рэалізацыі інтэрфейсу гукавой карты, а таксама вынікі верыфікацыі атрыманых інтанацыйных контураў.

Спектральны аналіз сінтэзаванага сігналу. Для верыфікацыі якасці сінтэзу прымяняецца аналіз спектраграмы праз кароткачасовае пераўтварэнне Фур'е (STFT) з параметрамі, узгодненымі з вакодэрам: даўжыня акна $L = 512$ адлікаў; крок $H = 128$; акно Хана:

$$\left|S(l,\,k)\right|^2 = \left|\sum_{n=0}^{L-1} y(lH+n)w(n)e^{-\frac{j2\pi kn}{L}}\right|^2,$$

дзе k – частотны бін $(k = 0, \ldots, L/2)$; l – часавы фрэйм. Спектраграма дазваляе візуальна кантраляваць наяўнасць і размяшчэнне фармант F_1–F_3, правільнасць F_0-гармонік (гарызантальныя палосы з крокам f_0), плыўнасць пераходаў паміж фанемамі і карэктнасць паўз.

Для лікавай ацэнкі якасці сінтэзу выкарыстоўваецца метрыка MCD (Mel Cepstral Distortion), якая вымярае адлегласць паміж мел-кепстральнымі каэфіцыентамі сінтэзаванага і эталоннага сігналаў пры $D = 24$ (стандартнае значэнне). Значэнне MCD < 6 дБ прынята лічыць паказчыкам высокай якасці; для распрацаванай сістэмы дасягнута значэнне 5,2 ± 0,4 дБ на тэставай выбарцы (мал. 1), што пацвярджае блізкасць сінтэзаванага сігналу да эталоннага па спектральных характарыстыках.

Мал. 1. Мел-спектраграмы эталоннага
і сінтэзаванага сігналаў (MCD ≈ 5,2 дБ)

Дадаткова для аналізу фармантнай структуры прымяняецца метад LPC-спектра (Linear Predictive Coding) – гладкай спектральнай ахінальнай, атрыманай метадам лінейнага прадказання, устойлівай да шуму і прыдатнай для дакладнай лакалізацыі фармант. Парадак прадказання абіраецца згодна з правілам Маркеля ($p \approx f_s/1000 + 2 \approx 24$ пры $f_s = 22050$ Гц); фарманты вызначаюцца як карані палі-номнай функцыі A(z), размешчаныя зблізку адзінкавай акружнасці ў z-плоскасці, а іх цэнтральная частата і паласа прапускання вылічваюцца праз аргумент і модуль адпаведнага кораня.

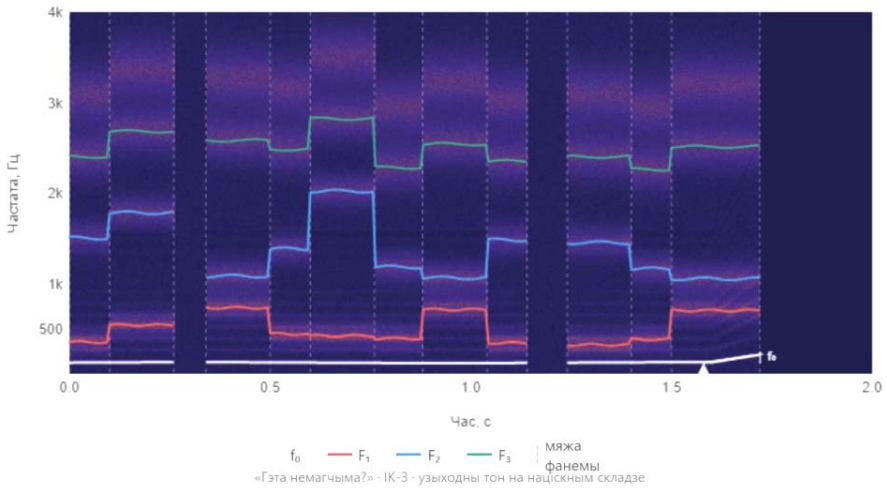
Апаратна-праграмная рэалізацыя інтэрфейсу гукавой карты. Праграмны вакодэр рэалізаваны на мове Python 3.11 з выкарыстаннем бібліятэк NumPy і SciPy для вектарных вылічэнняў і фільтрацыі, а таксама sounddevice – абгортцы над PortAudio для крос-платформавага выведу PCM-даных. Крытычныя па прадукцый-насці фрагменты (OLA-сінтэз, LPC-аналіз) рэалізаваны з выкарыстаннем кампілятара Numba JIT, што забяспечвае паскарэнне вылічэнняў у 20–40 разоў у параўнанні з чыстым Python.

Ключавой метрыкай прадукцыйнасці вакодэра з'яўляецца RTF (Real-Time Factor) – адноснасць часу вылічэнняў да працягласці сінтэзаванага сігналу; значэнне RTF < 1 азначае працу ў рэальным часе. Для поўнага пайплайна (лінгвістычны аналіз + + акустычная мадэль + вакодэр) без JIT-кампіляцыі RTF складае 147 %, у той час як прымяненне Numba JIT зніжае гэты паказчык да 31 %, забяспечваючы амаль трохразовы запас рэальнага часу.

Разгледжана таксама канцэптуальная магчымасць пераносу крытычных блокаў вакодэра на апаратныя платформы тыпу DSP (TI TMS320C6748) або FPGA (Xilinx Artix-7). Ацэнка паказвае, што ўсе блокі – FFT на 512 кропак, узбуджальнік на аснове фазавага акумулятара, крос-фэйд спектральных ахінальных, PSOLA-блок дублявання фрэймаў і інтэрфейс DAC/I2S – тэхнічна маюць быць рэалізаваныя на бюджэтнай FPGA з сумарным выкарыстаннем каля 7000 LUT з 20 800 даступных, што адпавядае прыкладна 35 % рэсурсаў мікрасхемы.

Верыфікацыя інтанацыйных контураў. Для дэманстрацыі ўкладу прасадычнай мадуляцыі параўноўваліся асцылаграмы трох варыянтаў сінтэзаванай фразы: без прасадычнай мадуляцыі ($f_0 = \text{const}, E = \text{const}$), з мадуляцыяй толькі па контуры f_0 і з поўнай прасадычнай мадуляцыяй ($f_0 + E +$ працягласці). Якасны аналіз паказвае, што першы варыянт мае манатонную ахінальную і ўспрымаецца як «рабатызаваная» гаворка, другі змяшчае прыкметны інтанацыйны контур, які ўспрымаецца як апавяданне, а трэці дадаткова вылучае націскны склад падвышанай амплітудай, што адпавядае акцэнтнай структуры слова.

Больш дэталевая верыфікацыя выканана шляхам параўнання інтанаграм для чатырох камунікатыўных тыпаў выказвання (мал. 2), сінтэзаваных на аснове аднаго і таго ж сегментнага матэрыялу і адрозных толькі прасадычным контурам f_0, у адпаведнасці з тыпалогіяй інтанацыйных канструкцый беларускага маўлення [4]. Параўнанне пацвярджае, што менавіта суперсегментны ўзровень цалкам вызначае камунікатыўны тып выказвання пры нязменным сегментным напаўненні, што сведчыць аб карэктнасці абранай архітэктуры з незалежнымі сегментным і прасадычным модулямі, звязанымі праз агульную часавую вось.



Мал. 2. Інтанаграмы розных тыпаў інтанацыйных канструкцый для адной і той жа фанетычнай паслядоўнасці

Дадаткова быў выкананы аналіз спектральнага партрэта прасадычных пераходаў на прыкладзе пытальнай фразы (ІК-3): паказана, што да націскнога склада значэнне f_0 захоўваецца практычна стацыянарным, на націскным складзе рэзка нарастае (узыходзячы тон), а на занацiскны складах спадае, суправаджаючыся зніжэннем інтэнсіўнасці; пры гэтым пераходы фармант на стыках фанем застаюцца плыўнымі, што пацвярджае карэктную працу спектральнага кросфэйда даўжыней 10 мс.

Праведзены спектральны аналіз (STFT, мел-спектраграмы, MCD = 5,2 ± 0,4 дБ) і ацэнка прадукцыйнасці (RTF = 0,31 з Numba JIT) пацвярджаюць, што рэалізаваная сістэма забяспечвае высокую якасць сінтэзу гаворкі ў рэальным часе. Верыфікацыя на аснове параўнання асцылаграм і інтанаграм паказала карэктную перадачу суперсегментных прасадычных характарыстык, а ацэнка апаратнай рэалізацыі на платформе FPGA класа Artix-7 (~35 % рэсурсаў) пацвердзіла тэхнічную магчымасць пераносу вакодэра на ўбудаваныя сістэмы.

Літаратура

1. Kubichek, R. Mel-cepstral distance measure for objective speech quality assessment / R. Kubichek // Proceedings of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. – 1993. – P. 125–128.
2. Markel, J. D. Linear Prediction of Speech / J. D. Markel, A. H. Gray. – Berlin : Springer-Verlag, 1976. – 288 p.
3. Morise, M. WORLD: a vocoder-based high-quality speech synthesis system for real-time applications / M. Morise, F. Yokomori, K. Ozawa // IEICE Transactions on Information and Systems. – 2016. – Vol. E99-D, N 7. – P. 1877–1884.
4. Выгонная, Л. Ц. Інтанацыя. Націск. Арфаэпія / Л. Ц. Выгонная. – Мінск : Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.
5. Xilinx Inc. Artix-7 FPGA Family Data Sheet: DC and AC Switching Characteristics. – San Jose: Xilinx, 2020.
6. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов : пер. с англ. / Л. Рабинер, Б. Голд ; под ред. Ю. Н. Александрова. – М. : Мир, 1978. – 848 с.

ПРАГРАМНАЯ РЭАЛІЗАЦЫЯ ВАКОДЭРА І МІКШЫРАВАННЕ СЕГМЕНТНЫХ І СУПЕРСЕГМЕНТНЫХ КАМПАНЕНТАЎ ПРЫ СІНТЭЗЕ МАЎЛЕННЯ

С. Ю. Крышнеў

Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Францыска Скарыны», Рэспубліка Беларусь

І. У. Блыхін

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

Навуковыя кіраўнікі: Ю. В. Крышнеў, М. У. Буракова

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

Разгледжана праграмная рэалізацыя вакодэра сістэмы сінтэзу маўленчых акустычных сігналаў, якая забяспечвае аднаўленне гукавога сігналу па мел-кепстральных каэфіцыентах з улікам кіравання суперсегментнымі (прасадычнымі) параметрамі выказвання – контурам асноўнага тону, інтэнсіўнасцю і працягласцю. Апісаны прынцыпы мікшыравання сегментнага і суперсегментнага патокаў даных пры сінтэзе гаворкі ў рэальным часе.

Ключавыя словы: сінтэз маўлення, вакодэр, мел-кепстральныя каэфіцыенты, прасадычная мадуляцыя, PSOLA, мікшыраванне, суперсегментны ўзровень, WASAPI.

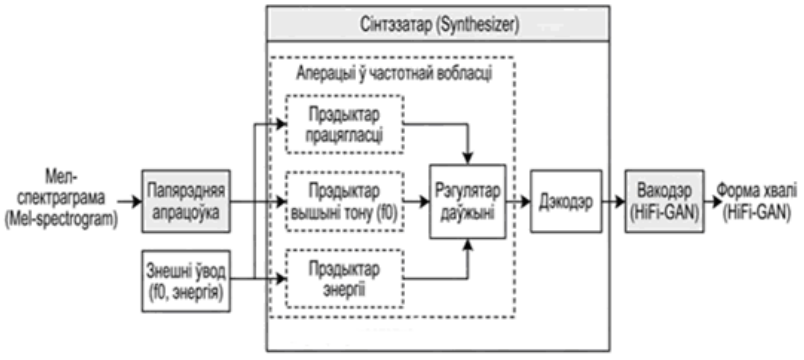
Сучасныя сістэмы сінтэзу маўлення (text-to-speech – TTS) пераўтварыліся з дапаможнага сродку агучвання тэксту ў неад'емны кампанент галасавых памочнікаў, аўтаматычных даведачных сістэм і сродкаў агучвання інфармацыі для людзей з парушэннямі зроку. Пры гэтым якасць успрымання сінтэзаванай гаворкі вызначаецца

не толькі пераборлівасцю асобных гукаў, але і натуральнасцю інтанацыйнага малюнку выказвання, які фарміруецца сукупнасцю суперсегментных (прасадычных) параметраў – частатой асноўнага тону, інтэнсіўнасцю і працягласцю складаў.

Прадметам праекта, на матэрыялах якога падрыхтаваны дадзены даклад, з'яўляюцца метады і алгарытмы лічбавага сінтэзу гаворкі з кіраваннем прасадычнымі характарыстыкамі, а мэтай – распрацоўка праграмна-апаратнага комплексу для сінтэзу натуральнай гаворкі з магчымасцю дынамічнага кіравання інтанацыйным малюнкам выказвання. Цэнтральным звяном такой сістэмы з'яўляецца вакодэр, і менавіта яго праграмнай рэалізацыі і механізму мікшыравання сегментных і суперсегментных кампанентаў прысвечана дадзеная праца.

Агульная архітэктура праграмнага вакодэра. Вакодэр (ад англ. «voice coder») з'яўляецца цэнтральным звяном сістэмы сінтэзу гаворкі: ен пераўтварае набор акустычных параметраў (мел-кепстральных каэфіцыентаў, контуру асноўнага тону f_0, параметраў аперыядычнасці) у гукавы сігнал часавай вобласці, прыдатны для прайгравання праз гукавую карту. У праграмнай рэалізацыі, арыентаванай на настольны камп'ютар, вакодэр працуе з буферамі PCM-даных (лічбавы гукавы паток фармату Pulse Code Modulation), якія перадаюцца аперацыйнай сістэмай у аўдыедрайвер праз адпаведны API.

У рабоце рэалізаваны вакодэр тыпу WORLD [1], адаптаваны для працы ў рэжыме сінтэзу з падтрымкай відавочнага кіравання асноўным тонам f_0 і параметрамі спектральнай ахінальнай. Архітэктурна сістэма падзяляецца на пяць модуляў (мал. 1): блок разліку спектральнай ахінальнай па мел-кепстральных каэфіцыентах; блок сінтэзу сігналу ўзбуджэння з кіраваннем па $f_0(t)$ і аперыядычнасці BAP(t); блок суперпазіцыі (фільтраванне ў частотнай вобласці); блок прасадычнай мадуляцыі, які накладае суперсегментныя элементы – контур f_0, ахінальную інтэнсіўнасці $E(t)$ і паўзы; блок мікшавання і вываду, які запісвае PCM-даныя ў кальцавы буфер і перадае іх на гукавую карту.



Мал. 1. Функцыянальная схема праграмнага вакодэра

Прынцыпова важна адрозніваць два ўзроўні апрацоўкі сігналу. Сегментны ўзровень адказвае за працу з асобнымі гукавымі адзінкамі (фанемамі, дыфонамі) працягласцю 10–150 мс, на якім апрацоўваюцца спектральныя ахінальныя і каэфіцыенты MCEP, што забяспечваюць пераборлівасць гаворкі. Суперсегментны (прасадычны) узровень апісвае інтанацыйны контур выказвання ў цэлым – траекторыю $f_0(t)$, ахінальную інтэнсіўнасці $E(t)$, паўзы і працягласці складаў, ахопліваючы часавыя маштабы ад 50 мс (склад) да некалькіх секунд (фраза).

Аднаўленне спектральнай ахінальнай і сінтэз сігналу ўзбуджэння. Акустычная мадэль на кожны фрэйм працягласцю 5 мс выдае вектар мел-кепстральных каэфіцыентаў памернасцю $D = 80$. Пераўтварэнне гэтых каэфіцыентаў у спектральную ахінальную $|H(\omega)|$ выконваецца праз мел-частотны кепстр:

$$\log\left|H(\omega)\right| = \sum_{k=0}^{D-1} c_k \cdot \cos\left(k \cdot a(\omega)\right),$$

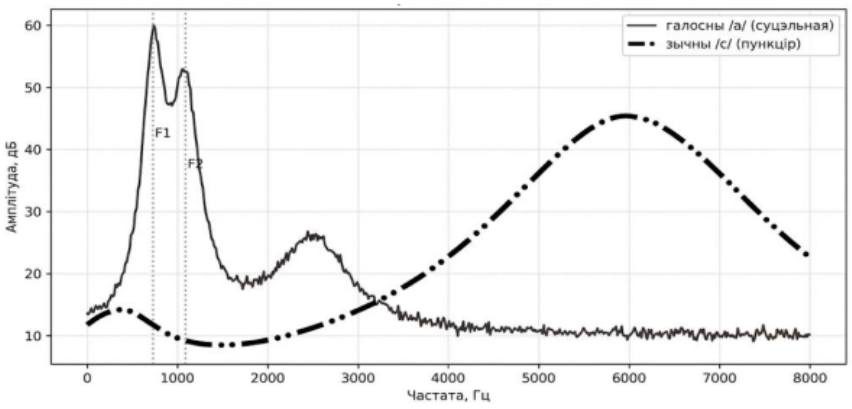
дзе c_k – мел-кепстральныя каэфіцыенты; $a(\omega)$ – мел-адлюстраванне частаты:

$$a(\omega) = 2\arctan\frac{(a_\omega \sin\omega)}{(1 - a_\omega \cos\omega)} \approx 0{,}58 \text{ для } = 22050 \text{ Гц}.$$

Пасля пераўтварэння атрыманыя значэнні $\left|H(\omega)\right|$ нармуюцца з улікам мэтавай магутнасці фрэйма, якая задаецца прасадычным прэдыктарам праз параметр энергіі E:

$$H_{\text{norm}}(\omega) = H(\omega)\sqrt{\frac{E}{\sum_\omega \left|H(\omega)\right|^2}}.$$

Спектральная ахінальная для гукаў /a/ і /c/ дадзена на мал. 2.



Мал. 2. Спектральная ахінальная для гукаў /a/ і /c/

Сігнал узбуджэння $u(t)$ будуецца як лінейная суперпазіцыя перыядычнага (voiced) і шумавога (unvoiced) складнікаў з вагавымі каэфіцыентамі, якія задаюцца параметрам аперыядычнасці $BAP(t) \in [0, 1]$:

$$u(t) = \sqrt{1 - BAP(t)}\, u_p(t) + \sqrt{BAP(t)}\, u_n(t),$$

дзе $u_p(t)$ – перыядычны кампанент (імпульсны сігнал з перыядам $T = 1/f_0$);), $u_n(t)$ – белы гаўсаў шум з адзінкавай дысперсіяй.

Перыядычны кампанент фарміруецца як паслядоўнасць сінхранізаваных глатальных імпульсаў формы Клата–Лільянкранца (Klatt-Liljencrants), а частата іх ідзе пад кіраваннем назапашвальнага лічыльніка фазы, што забяспечвае плыўнае змяненне f_0 без разрываў сігналу.

Сінтэз фрэйма і прасадычная мадуляцыя. Сінтэз кожнага фрэйма выконваецца метадам overlap-add (OLA) з акном Хана даўжыней $L = 512$ адлікаў і крокам $H = 110$ адлікаў (5 мс пры $f_s = 22050$ Гц), пасля чаго выніковыя фрэймы сумуюцца з нармаваннем, якое прадухіляе амплітудныя артэфакты пры перакрыцці вокнаў.

Контур асноўнага тону $f_0(t)$ з'яўляецца галоўным носьбітам інтанацыйнай інфармацыі. Прасадычны прэдыктар фармуе дыскрэтны контур $f_0[k]$ з крокам 5 мс, які затым лагарыфмічна інтэрпалюецца паміж ключавымі кропкамі (для захавання перцэпцыйнай лінейнасці шкалы паўтонаў) і згладжваецца фільтрам першага парадку з пастаяннай часу $\tau_f_0 \approx 8$ мс, што падаўляе высокачастотныя калыханні, уласцівыя дыскрэтнай акустычнай мадэлі.

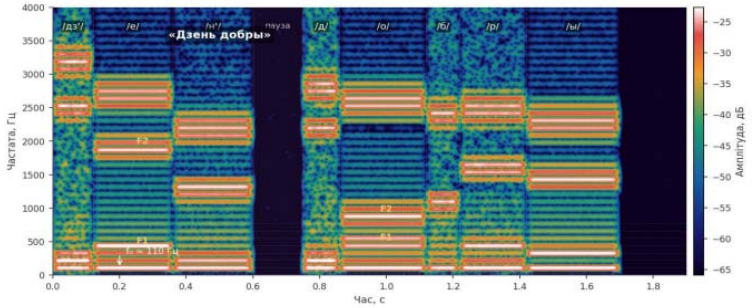
Ахінальная інтэнсіўнасці $E(t)$ адлюстроўвае ўдарна-рытмічную структуру фразы: націсканыя склады вылучаюцца падвышанай інтэнсіўнасцю, ненаціскныя – паніжанай. Значэнні $E[k]$, зададзеныя ў дэцыбелах, пераводзяцца ў лінейны маштаб і ўжываюцца да сігналу праз мультыплікатыўную мадуляцыю з косінусным кросфэйдам паміж суседнімі фрэймамі, што пазбягае клікаў на межах.

Кіраванне працягласцямі сегментаў рэалізуецца алгарытмам PSOLA (Pitch-Synchronous Overlap-Add): пры павелічэнні працягласці сегмента фрэймы дублююцца, пры памяншэнні – прапускаюцца, прычым маркеры фрэймаў прывязваюцца да найбліжэйшых глатальных імпульсаў, што захоўвае пітч-сінхроннасць і выключае перцэпцыйна прыкметныя артэфакты на стыках. Паўзы ўстаўляюцца ў выхадны буфер як блокі нулявых (сінтэтычныя паўзы) або нізкаамплітудных шумавых (запоўненыя паўзы) адлікаў зададзенай працягласці на аснове сінтаксічнага аналізу тэксту.

Мікшыраванне сегментнага і суперсегментнага патокаў. Пад мікшыраваннем разумеецца аб'яднанне двух незалежна сфармаваных патокаў даных – сегментнага сінтэзаванага сігналу і суперсегментных кіравальных параметраў – у адзіны PCM-струмень. Алгарытм працуе ў рэальным часе на ўзроўні буфераў гукавой карты (512–2048 адлікаў, што адпавядае 23–93 мс пры $f_s = 22050$ Гц) і прымяняе суперсегментныя параметры да сегментнага сігналу ў строгай паслядоўнасці: кіраванне перыядычнасцю ўзбуджальніка, кіраванне спектральнай ахінальнай праз MCEP бягучай фанемы, мадуляцыя аперыядычнасці, маштабаванне па працягласці (PSOLA), мультыплікатыўная мадуляцыя інтэнсіўнасці і, нарэшце, устаўка паўз.

Ключавой задачай пры гэтым з'яўляецца дакладнае часавае выраўноўванне прасадычных падзей (пікаў f_0, нарастанняў інтэнсіўнасці) з адпаведнымі націскнымі складамі, паколькі рассінхранізацыя больш за ± 20 мс перцэпцыйна прыкметная слухачу. Для гэтага для кожнай фанемы вызначаюцца адзнакі часу пачатку і канца ў адзінках фрэймаў вакодэра, а прасадычныя параметры індэксуюцца ў адзінках рэальнага часу, а не фанем ці фрэймаў, што сінхранізуе абодва патокі праз агульную часавую шкалу. Пры пераходзе паміж суседнімі фанемамі прымяняецца спектральны кросфэйд даўжыней 10 мс, які прадухіляе рэзкія скачкі спектральнай ахінальнай (мал. 3).

Перадача гатовых PCM-даных на гукавую карту рэалізавана праз падвойную буферызацыю з кальцавым буферам емістасцю ў чатыры блокі; сінхранізацыя паміж струменем сінтэзу і аўдыекалбекам, які выконваецца з рэальначасавым прыярытэтам, ажыццяўляецца атамарнымі індэксамі чытання і запісу. Для Windows выкарыстоўваецца WASAPI Exclusive Mode, для Linux – ALSA праз snd_pcm_writei(). Разлічаная затрымка сістэмы складае каля 11,6 мс, што значна ніжэй перцэпцыйнага парогу ў ~20 мс і забяспечвае прыдатнасць рашэння для інтэрактыўных дадаткаў.



Мал. 3. Спектраграма сінтэзаванай фразы з бачнымі фармантнымі пераходамі на межах фанем

Такім чынам, прапанаваная рэалізацыя вакодэра забяспечвае аднаўленне якаснага маўленчага сігналу з натуральнай інтанацыяй за кошт выразнага падзелу сегментнай і суперсегментнай апрацоўкі і іх строга ўпарадкаванага мікшыравання. Выкарыстанне алгарытмаў OLA, PSOLA і спектральнага кросфэйда дазваляе пазбегнуць пераходных артэфактаў, а падвойная буферызацыя забяспечвае працу сістэмы ў рэальным часе з непрыкметнай для слыху затрымкай.

Літаратура

1. Morise, M. WORLD: a vocoder-based high-quality speech synthesis system for real-time applications / M. Morise, F. Yokomori, K. Ozawa // IEICE Transactions on Information and Systems. – 2016. – Vol. E99-D, N 7. – P. 1877–1884.
2. Moulines, E. Pitch-synchronous waveform processing techniques for text-to-speech synthesis using diphones / E. Moulines, F. Charpentier // Speech Communication. – 1990. – Vol. 9, N 5–6. – P. 453–467.
3. FastSpeech 2: Fast and High-Quality End-to-End Text to Speech / Y. Ren [et al.] // Proceedings of ICLR. – 2021.
4. Klatt, D. H. Software for a cascade/parallel formant synthesizer / D. H. Klatt // Journal of the Acoustical Society of America. – 1980. – Vol. 67, N 3. – P. 971–995.
5. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов : пер. с англ. / Л. Рабинер, Б. Голд ; под ред. Ю. Н. Александрова. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
6. Айфичер, Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.

МАКСИСЕЛЕКТОР ПИТАНИЯ ОТ СТАЦИОНАРНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В. С. Тимофеенко, Н. В. Туровец

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

Научный руководитель А. Е. Запольский

Рассмотрена разработка интеллектуального максиселектора питания, который обеспечивает автоматическое переключение нагрузки между стационарной электросетью и фотоэлектрическими преобразователями в составе гибридной системы электроснабжения. Приведены принципы работы ключевых компонентов (фотопреобразователей, инверторов, контроллеров заряда), алгоритм управления на основе анализа напряжения в реальном времени, а также дана оценка экологических показателей.

Ключевые слова: максиселектор, гибридная система электроснабжения, фотоэлектрические преобразователи, инвертор, контроллер заряда, возобновляемая энергетика, энергоэффективность.

Современный этап развития малой энергетики характеризуется стремительным повышением требований к надежности электроснабжения, снижению эксплуатационных затрат и экологической безопасности. Одним из перспективных направлений является внедрение гибридных систем, интегрирующих традиционные стационарные электросети и возобновляемые источники энергии (ВИЭ), в частности, фотоэлектрические преобразователи (ФЭП).

Ключевым узлом управления в таких комплексах выступает максиселектор питания – интеллектуальный программно-аппаратный комплекс, который обеспечивает непрерывный мониторинг параметров источников энергии и автоматическое переключение нагрузки на наиболее стабильный и экономически выгодный вариант в реальном времени [4, 5].

Эффективная интеграция ВИЭ и стационарной сети требует четкого взаимодействия всех узлов системы, в том числе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), инверторов, контроллеров заряда.

Работают ФЭП на основе прямого фотоэлектрического эффекта [1, 2, 4]. Коэффициент полезного действия определяется оптическими и электрофизическими параметрами материалов. Ключевыми факторами, ограничивающими эффективность, являются отражение излучения, рассеяние энергии в тепло, внутреннее сопротивление и рекомбинация фотоносителей. Современные ФЭП обеспечивают срок службы до 25–30 лет при минимальных требованиях к обслуживанию.

Инверторы необходимы для преобразования постоянного тока (DC), генерируемого ФЭП и аккумулируемого в батареях (АКБ), в переменный ток (AC) промышленной частоты. Инверторы обеспечивают синхронизацию работы с централизованной сетью.

Контроллеры заряда выполняют функции защиты АКБ от перезаряда и глубокого разряда, оптимизируют режимы зарядки и предотвращают протекание обратных токов от аккумуляторов к панелям в темное время суток.

Максиселектор реализует алгоритм выбора источника питания по критерию максимального напряжения в реальном времени с абсолютным приоритетом возобновляемой энергии. Возможные режимы: режим приоритетной генерации, режим дефицита энергии, режим автовозврата.

В режиме приоритетной генерации при достаточном уровне солнечной инсоляции максиселектор направляет ток от ФЭП на питание нагрузки и подзарядку АКБ.

В случае падения выработки (падение инсоляции, облачность, ночное время) происходит автоматическое переключение питания нагрузки на стационарную сеть или накопительные АКБ – режим дефицита энергии [3].

Режим автовозврата срабатывает при восстановлении требуемого уровня солнечной генерации: система мгновенно возвращается к задействованию ФЭП [5].

Благодаря высокой скорости коммутации переключение осуществляется незаметно для потребителя, гарантируя непрерывность технологических и бытовых процессов.

В ходе исследования выделены три базовые схемы включения: 1) сетевая (On-Grid) – прямая передача излишков энергии в сеть без использования АКБ; 2) автономная (Off-Grid) – полная независимость от внешней сети с аккумулированием всего объема энергии в АКБ; 3) гибридная (Hybrid) – архитектура, включающая ФЭП, гибридный инвертор, АКБ и подключение к внешней сети (рис. 1, 2).

Гибридный режим позволяет реализовывать экспорт излишков энергии, обеспечивать резервное питание при авариях и минимизировать потребление из сети в пиковые часы.

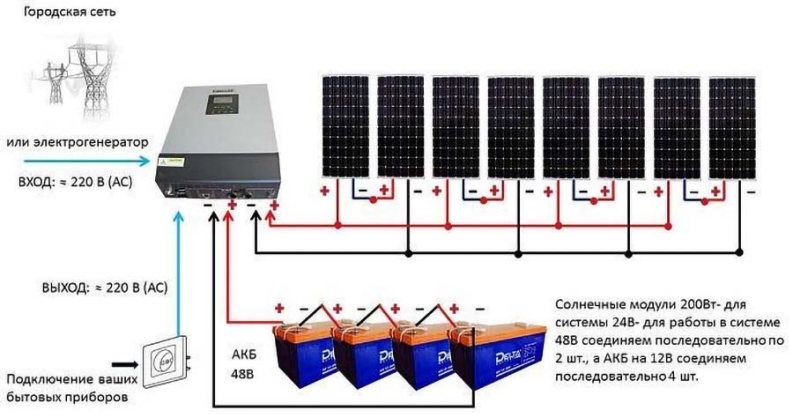


Рис. 1. Гибридная система электроснабжения
с солнечными панелями и стационарной сетью

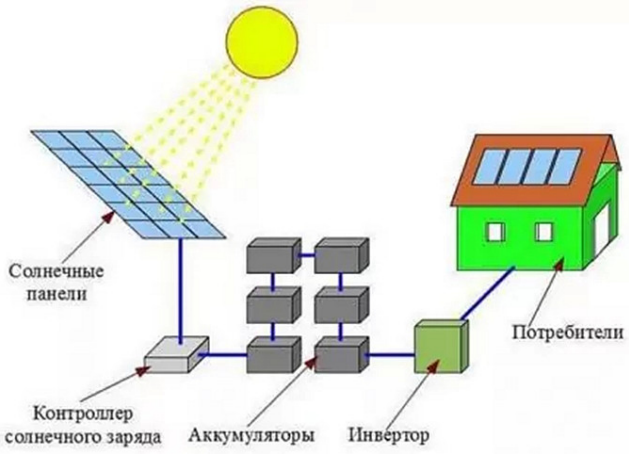


Рис. 2. Схема подключения гибридной солнечной системы

Внедрение системы с максиселектором напрямую способствует снижению углеродного следа за счет сокращения объема сжигания ископаемого топлива на ТЭС, а также обеспечивает устойчивое развитие энергетики в частном секторе, коммерческой сфере и на удаленных объектах.

Максиселектор питания является ключевым элементом интеллектуальных гибридных систем электроснабжения. Интеграция устройства обеспечивает надежность, экономичность, экологичность.

Надежность заключается в сверхбыстрой автоматической коммутации между источниками и предотвращении аварийных отключений. Экономический эффект достигается снижением расходов за счет максимального использования бестопливной солнечной генерации.

Литература

1. Системы солнечные фотоэлектрические. Термины и определения : ГОСТ Р 57229-2016. – М. : Стандартинформ, 2017. – 16 с.
2. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Модули фотоэлектрические. Общие технические условия : ГОСТ Р 51595-2000. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 19 с.

3. Запольскі, А. Я. Выбар фотаэлектрычных пераўтваральнікаў для павышэння энергетычнай эфектыўнасці станцый катоднай абароны падземных трубаправодаў / А. Я. Запольскі, М. А. Рогаў ; навук. кіраўнік Ю. В. Крышнеў // 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 им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – Ч. 2. – С. 65–68.
4. Messenger, R. Photovoltaic Systems Engineering / R. Messenger, J. Ventre. – 2nd ed. – CRC Press, 2003. – 480 p.
5. Esram, T. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques / T. Esram, P. L. Chapman // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22, N 2. – P. 439–449.

СОВРЕМЕННЫЙ КРИЗИС ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СТРАТЕГИИ ВЫХОДА

А. А. Антоненко

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

Научные руководители: Ю. В. Крышнев, Н. А. Красовская, А. Е. Запольский

Рассмотрены причины возникновения кризиса оперативной памяти современных вычислительных систем, проявляющегося в эффекте «стены памяти» (Memory Wall), и предложены технологические стратегии преодоления данного узкого места.

Ключевые слова: оперативная память, DRAM, Memory Wall, HBM, CXL, Processing-in-Memory, энергонезависимая память, MRAM, ReRAM, PCM, FeRAM, фон-неймановская архитектура.

Современные вычислительные системы столкнулись с фундаментальным ограничением – «стеной памяти». За два десятилетия скорость процессоров возросла примерно в 1000 раз, а DRAM – всего в 10 раз [1]. Процессор простаивает 60–90 % времени, а одно обращение к памяти эквивалентно ~500 арифметическим операциям [1]. Проблему усугубляют требования ИИ и Big Data [5].

Классическая фон-неймановская архитектура исчерпала возможности наращивания частоты шины. Ситуация обусловлена тремя факторами. Физический: технология DRAM достигла предела ~10 нм, дальнейшее масштабирование ведет к утечкам заряда [4]. Экономический: новый завод требует 20–30 млрд долл. при стагнации физического масштабирования, что стимулирует переход к архитектурной оптимизации. Архитектурный: раздельные блоки памяти и обработки создают барьер для роста производительности.

Для преодоления кризиса предложено эволюционное направление – оптимизация иерархии памяти через технологии HBM и CXL. HBM (3D-стекирование памяти у процессора) обеспечивает пропускную способность порядка терабайт в секунду, а CXL – когерентный доступ к общему пулу памяти в дата-центре [5]. CXL 3.0 поддерживается в Intel Xeon 6-го поколения и AMD EPYC, позволяя создавать масштабируемые пулы памяти [5] (рис. 1).

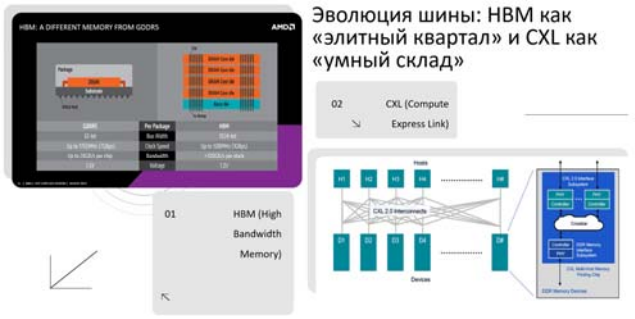


Рис. 1. Сравнительная схема архитектур HBM (3D-стекирование) и CXL (общий пул памяти через интерконнект)

Революционное направление (Processing-in-Memory – PIM): перенос вычислений в массив памяти устраняет основной источник энергопотребления (перемещение данных между памятью и процессором) [2] и особенно эффективен для тензорных вычислений и машинного обучения. Коммерческие реализации уже существуют: серверные модули DIMM от UPMEM со встроенными процессорными ядрами выполняют тензорные операции без передачи данных в CPU, что актуально для ИИ-инфраструктуры [2].

Эти технологии переходят от лабораторных исследований к коммерции. MRAM: Everspin Technologies сертифицировала 256 Мбит чипы для аэрокосмоса, Samsung предлагает встраиваемый MRAM вплоть до 5 нм [4]. ReRAM активно переходит от лабораторных образцов к серийному производству, находя применение во встраиваемых микроконтроллерах [3]. PCM остается в нише storage-class memory с масштабированием ниже 20 нм [4]. FeRAM переходит к субмикронным техпроцессам с трехмерной архитектурой конденсатора, что открывает путь к применению в Edge AI.

Сравнительные характеристики технологий энергонезависимой памяти

Технология	**Принцип работы**	**Статус на 2025–2026**	**Ключевое преимущество**	**Основные барьеры**
MRAM	Спиновое туннелирование, магнитные состояния	Массовое производство для автомобильной и космической электроники (22 нм → переход на 12 нм в 2026)	Неограниченная перезапись, радиационная стойкость (rad-hard)	Сложность производства при < 10 нм, высокий ток записи
ReRAM	Образование и разрушение проводящих филаментов в оксиде	Запуск в серийных MCU (28 нм → → 22 нм), экспериментальные образцы на 14 нм	Простота интеграции в BEOL, in-memory computing	Вариабельность параметров, ограниченный ресурс ($> 10^6$ циклов)
PCM	Фазовый переход (аморфное/кристаллическое состояние)	Ограниченное производство (28 нм → → 18 нм), используется в 3D XPoint-подобных решениях	Отличная масштабируемость, ячейка до 0,019 мкм²	Высокое энергопотребление при записи, дрейф сопротивления

Окончание

Технология	Принцип работы	Статус на 2025–2026	Ключевое преимущество	Основные барьеры
FeRAM	Сегнетоэлектрическая поляризация ($HfZrO_2$)	Технология на стадии пилотных партий (22 нм), основное применение – замена SRAM в IoT	Низкое напряжение, замена SRAM/DRAM	Проблемы масштабирования ниже 20 нм, деградация при высоких температурах

Примечание. Составлено на основе [3, 4].

В краткосрочной перспективе эффективность иерархии памяти повышается за счет интеллектуальных контроллеров («умных шлюзов»), анализирующих паттерны доступа и использующих адаптивную предвыборку и динамическое переупорядочивание команд, что особенно эффективно для смешанных нагрузок серверов баз данных и ИИ-инференса [1]. Применение таких контроллеров и технологий PIM позволяет сократить время простоя процессора на 20–40 % без модификации аппаратной части [5] и значительно уменьшить тепловыделение, поскольку движение данных по шине энергозатратнее арифметических операций [2], что критически важно для энергоэффективности Центра обработки данных (ЦОД).

Рис. 2. Дорожная карта развития технологий памяти на период 2026–2036 гг.
Примечание. Составлено на основе [4].

В 2026–2030 гг. ожидается массовое внедрение HBM4, CXL 3.0, первых PIM-ускорителей и запуск 8–10 новых заводов памяти [5] (рис. 2). Однако новые линии требуют 2–3 лет на сертификацию, поэтому дефицит и высокие цены на HBM для ИИ-ускорителей сохранятся минимум до 2028 г., что стимулирует внедрение архитектурных оптимизаций (CXL, PIM) на существующем оборудовании. В 2030–2035 гг. сформируется единое адресное пространство, объединяющее DRAM, энергонезависимую память класса SCM (MRAM/ReRAM/PCM) и CXL, а нейроморфные чипы и энергонезависимая память станут стандартом для IoT [4]. После 2035 г. – постепенный отказ от фон-неймановской архитектуры в пользу data-centric вычислений с ReRAM/PCM качестве основной памяти и появление гибкой электроники на 2D-материалах [2, 4].

Будущее вычислительной техники определяет архитектура памяти и организация взаимодействия с данными. Для ЦОД и ИИ-инфраструктуры комбинация HBM и CXL – наиболее реалистичное краткосрочное решение, увеличивающее пропускную способность в 3–5 раз без смены техпроцесса. В долгосрочной перспективе доминируют гибридные системы, сочетающие быструю DRAM для горячих данных и энергонезависимую память – для холодных, с максимальным приближением вычислений к хранилищу.

Литература

1. Patterson, D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach / D. A. Patterson, J. L. Hennessy. – 6th ed. – Morgan Kaufmann, 2019. – 856 p.
2. Processing Data Where It Makes Sense: Enabling In-Memory Computation / O. Mutlu [et al.] // Microprocessors and Microsystems. – 2019. – Vol. 67. – P. 28–41.
3. Metal-Oxide RRAM / H.-S. P. Wong [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2012. – Vol. 100, N 6. – P. 1951–1970.
4. IEEE International Roadmap for Devices and Systems (IRDS™) – 2025 Update: Memory and Storage. – IEEE, 2025.
5. Kim, J. High-Bandwidth Memory (HBM) and Compute Express Link (CXL): The New Memory Hierarchy for AI / J. Kim, S. Lee, H. Park // IEEE Micro. – 2025. – Vol. 45, N 2. – P. 22–31.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЙ РЕГИСТРАТОР ТЕМПЕРАТУРЫ С ГРАФИЧЕСКИМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ ДИСПЛЕЕМ

С. Е. Рождаев

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

Научный руководитель Э. М. Виноградов

Рассмотрен микроконтроллерный регистратор температуры, который измеряет и отображает температуру окружающей среды в реальном времени на индикаторе графического жидкокристаллического дисплея.

Ключевые слова: графический жидкокристаллический дисплей, контроллер, среда разработки mikroC PRO for PIC, библиотечные функции, аналого-цифровой преобразователь.

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.

Фирма Samsung разработала специальную микросхему – контроллер KS0108 – для управления подобными ЖК-дисплеями. Эти дисплеи можно встретить в самых разнообразных устройствах: измерительных приборах, медицинском оборудовании, промышленном и технологическом оборудовании.

Важнейшей задачей при проектировании микроконтроллерной системы является выбор средства разработки. Одним из таких программных инструментов является среда разработки сербской компании MikroElektronika. Компания MikroElektronika создала среду разработки mikroC PRO for PIC для PIC-микроконтроллеров [1]. С целью облегчения разработки программ в интегрированной среде mikroC PRO for PIC имеются библиотечные функции для управления графическим ЖКД на основе контроллера KS0108 [2]. Рассмотрим некоторые функции:

- ***Glcd_Init()*** – функция инициализирует модуль ГЖКД.
- ***Glcd_Fill()*** – функция используется для очистки ГЖКД.
- ***Glcd_Dot()*** – рисует точку на ГЖКД.
- ***Glcd_Write_Char()*** – функция отображает символ на ГЖКД.
- ***Glcd_Write_Text()*** – функция отображает текст на ГЖКД.
- ***Glcd_Set_Font()*** – выбирает шрифт.
- ***Glcd_H_Line()*** – рисует горизонтальную линию.
- ***Glcd_V_Line()*** – рисует вертикальную линию.

В докладе рассматривается микроконтроллерный регистратор температуры, который отображает температуру окружающей среды на индикаторе ГЖКД в реальном времени. Принципиальная схема регистратора представлена на рис. 1.

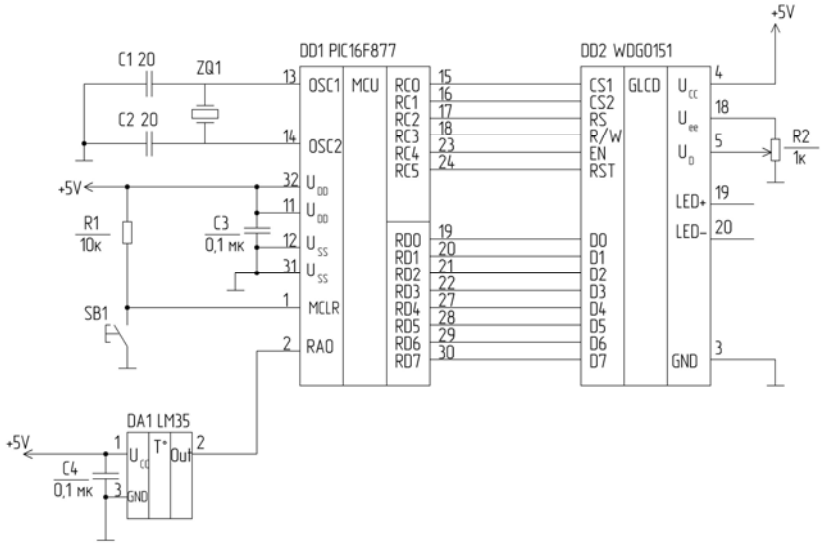


Рис. 1. Принципиальная схема регистратора температуры

В регистраторе температуры используется модуль WDG0151 с монохромным ЖК-индикатором производства компании Winstar размером 128 × 64 пикселя. Он выполнен на базе двух контроллеров, совместимых с контроллерами Samsung KS0108.

В качестве датчика температуры используется микросхема LM35 (DA1). Датчик выдает напряжение U_{out}, прямо пропорциональное измеряемой температуре в градусах Цельсия: $U_{\text{out}} = 10$ мВ/°С.

Для управления модулем ГЖКД используются порты *C* и *D* микроконтроллера PIC16F877. Внутренний аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера выдает 10-разрядный двоичный код. Поэтому при опорном напряжении, равном напряжению питания +5 В, разрешение АЦП будет 5000/1023 = 4,88 мВ. А это достаточно для измерения температуры с точностью до 0,5 °С.

В начале программы определяется соединение портов *C* и *D* микроконтроллера с выводами ГЖКД. Вывод порта *RA*0 настраивается на ввод для работы с аналоговым датчиком температуры.

Затем инициализируется модуль ГЖКД с помощью библиотечной функции Glcd_Init() и очищается экран индикатора с помощью функции Glcd_Fill(0x00). Внутренний АЦП микроконтроллера инициализируется вызовом библиотечной функции ADC_Init().

Далее программа вызывает функцию пользователя PlotAxis(). Эта функция рисует оси координат *X* и *Y*, на которые наносятся штрихи с помощью функции Glcd_Dot(). На ось *Y* наносятся метки от 0 °C до 50 °C с шагом 10 °C при помощи функции Glcd_Write_Text().

Затем программа входит в бесконечный цикл повторения с помощью инструкции while(1). Внутри этого цикла аналоговая температура от датчика преобразуется в цифровой формат и сохраняется в переменной с именем temp с помощью функции ADC_Read(0), в которой номер канала определен как 0 для линии порта *RA*0. Это цифровое значение преобразуется в милливольты путем умножения на 5000 и деления на 1023. Действительная температура в градусах Цельсия рассчитывается путем деления полученного напряжения в милливольтах на число 10.

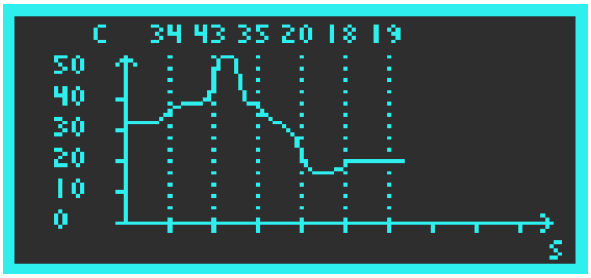


Рис. 2. График изменения окружающей температуры

Далее программа вызывает пользовательскую функцию PlotXY(), которая выводит на ГЖКД график изменения температуры через 1 с. Для построения графика используется библиотечная функция Glcd_Line(). Эта функция рисует линию между координатами по оси *Y* через 1 с. Также эта функция выводит вверху графика значение температуры каждые 10 °C и рисует штриховую линию сетки при помощи функции Glcd_Dot() в цикле for(). На рис. 2 приведен график изменения окружающей температуры через 1 с.

Литература

1. Шпак, Ю. А. Программирование на языке C для AVR и PIC микроконтроллеров / Ю. А. Шпак. – К. : МК-Пресс ; СПб. : КОРОНА-ВЕК, 2011. – 544 с.
2. MikroC PRO for PIC. User's manual. – 2014. – URL: http://www.mikroe.com (дата обращения: 15.03.2026).

ЛИФТОВАЯ ПАНЕЛЬ С СИСТЕМОЙ ГОЛОСОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Д. А. Роговой

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

Научный руководитель Д. А. Литвинов

Рассмотрено проектирование интеллектуальной лифтовой панели с системой локального распознавания голосовых команд на базе микроконтроллера ESP32-S3.

Ключевые слова: лифтовая панель, голосовое управление, распознавание речи, TensorFlow Lite Micro, ESP32-S3, Keyword Spotting, CAN, RS-485, микроконтроллер.

Лифтовые системы являются важной частью инженерной инфраструктуры современных зданий. Для взаимодействия пользователя с лифтом применяются панели управления, устанавливаемые внутри кабины (рис. 1) и на этажах здания. Панель управления внутри кабины называется Car Operating Panel (COP), а панель вызова лифта (рис. 2) на этажах – Landing Operating Panel (LOP) [1]. Традиционно управление осуществляется посредством кнопочного интерфейса, однако развитие технологий обработки речи позволяет использовать голосовые команды в качестве дополнительного способа взаимодействия пользователя с лифтовой системой.

Рис. 1. Панель управления внутри кабины лифта

Рис. 2. Панель вызова лифта

Использование голосового управления позволяет повысить удобство эксплуатации лифта для различных категорий пользователей, включая людей с ограниченными возможностями, а также обеспечивает возможность бесконтактного взаимодействия с системой управления.

Для реализации распознавания речи в проектируемом устройстве используется фреймворк TensorFlow Lite Micro, предназначенный для выполнения моделей машинного обучения на микроконтроллерах и других устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами [2]. Основными преимуществами TensorFlow Lite Micro являются оптимизация под встраиваемые системы, поддержка квантованных моделей и простота интеграции в программное обеспечение микроконтроллера.

Перед использованием системы выполняется обучение модели распознавания голосовых команд. Данный процесс осуществляется на персональном компьютере, поскольку требует значительных вычислительных ресурсов. Обучение включает несколько последовательных этапов: формирование набора аудиоданных, предварительную обработку аудиосигналов, извлечение признаков, обучение модели Keyword Spotting, а также конвертацию и квантование полученной модели для дальнейшего использования во встраиваемой системе [3].

Для формирования обучающей выборки записываются голосовые команды различных пользователей. После этого аудиосигналы преобразуются в набор признаков с использованием мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC), позволяющих компактно описывать спектральные характеристики человеческой речи [4]. Полученные признаки используются для обучения нейронной сети, способной различать заранее определенный набор голосовых команд.

В качестве аппаратной платформы выбран микроконтроллер ESP32-S3-WROOM-1. Данный микроконтроллер содержит двухъядерный процессор Xtensa LX7 с тактовой частотой до 240 МГц, 512 КБ оперативной памяти SRAM и 8 МБ PSRAM, а также поддерживает широкий набор интерфейсов ввода-вывода, включая I2S, SPI, I2C, UART и USB-OTG [5]. Вычислительных ресурсов ESP32-S3 достаточно для выполнения предварительной обработки аудиосигналов и локального запуска модели распознавания речи.

Работа системы (рис. 3) начинается с приема голосовой команды пользователя цифровым MEMS-микрофоном. Далее аудиосигнал поступает в микроконтроллер, где выполняются фильтрация шумов и нормализация уровня сигнала. После предварительной обработки производится извлечение признаков MFCC и формирование признакового вектора для дальнейшего анализа.

Полученные признаки подаются на вход нейронной сети, реализованной с использованием TensorFlow Lite Micro. Для распознавания голосовых команд применяется метод Keyword Spotting, предназначенный для обнаружения заранее определенных ключевых слов в непрерывном аудиопотоке. После успешного распознавания микроконтроллер формирует управляющую команду, соответствующую выбранному этажу или другой функции управления.

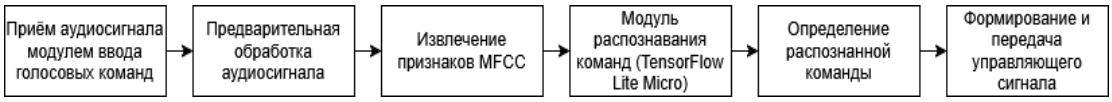


Рис. 3. Схема процесса распознавания речи и формирования управляющего сигнала

В состав устройства (рис. 4) входят микроконтроллер ESP32-S3, цифровой микрофон, кнопочный блок, дисплей и интерфейсные модули связи. Передача команд в систему управления лифтом может осуществляться по промышленным интерфейсам RS-485 или CAN. Использование двух интерфейсов обеспечивает возможность интеграции устройства с различными типами лифтовых контроллеров и существующими системами автоматизации.

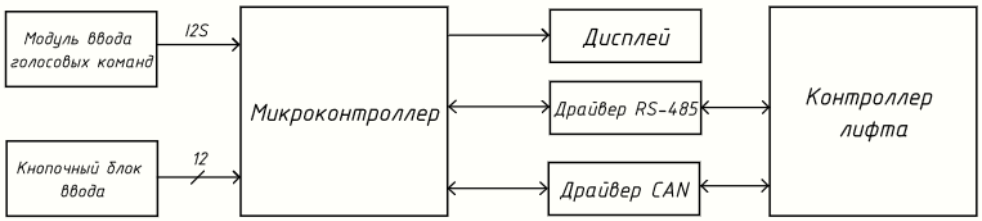


Рис. 4. Структурная схема проектируемого устройства

После распознавания голосовой команды микроконтроллер формирует пакет данных и передает его в систему управления лифтом через соответствующий интерфейс связи. Контроллер лифта принимает команду и управляет исполнительными механизмами лифтовой установки, включая привод перемещения кабины и систему управления дверями.

Применение локального распознавания речи позволяет обеспечить автономную работу устройства без подключения к облачным сервисам, уменьшить задержки обработки команд и повысить надежность функционирования системы. Благодаря этому разработанное решение может использоваться в современных интеллектуальных лифтовых системах, где предъявляются повышенные требования к безопасности, доступности и удобству эксплуатации.

Литература

1. Что такое COP и LOP. – URL: https://dazentech.com/ru/что-такое-лифт-cop-и-lop/ (дата обращения: 11.03.2026).
2. Руководство по использованию платформы TensorFlow. – URL: https://www.tensorflow.org/guide (дата обращения: 11.03.2026).
3. Предварительная обработка набора аудиоданных. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/data-analysis/preprocessing-the-audio-dataset/ (дата обращения: 28.02.2026).
4. Петровец, В. Н. Использование алгоритма MFCC в задаче распознавания музыкальных композиций / В. Н. Петровец, П. Л. Мискевич, Д. В. Деменковец // Компьютерные системы и сети : сб. ст. 59-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 17–21 апр. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т информ. и радиоэлектроники. – Минск, 2023. – С. 412–413.
5. Микросхема ESP32-S3-WROOM-1U-N16R8. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf/ (дата обращения: 28.02.2026).

ПЛАТФОРМА ДЛЯ ИНОСТРАННЫХ АБИТУРИЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ AI

Д. С. Санец, А. А. Антоненко

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

Научный руководитель А. Е. Запольский

Рассмотрено применение технологий обработки естественного языка и машинного обучения для автоматизации сопровождения иностранных абитуриентов. Внедрение цифровых технологий и искусственного интеллекта во многом определяет сегодняшние образовательные тренды [1].

Ключевые слова: искусственный интеллект, иностранные абитуриенты, цифровая платформа, машинное обучение, обработка естественного языка, рекомендательная система, парсинг данных.

Ручная обработка запросов иностранных абитуриентов традиционно производится с помощью сотрудников международного отдела и приемной комиссии вуза (рис. 1).

Одним из этапов подготовки к зачислению является выделение полезной информации из предоставляемых документов (аттестатов, дипломов), а также преодоление языкового барьера. Технологии обработки естественного языка (NLP) активно исследуются в наше время. Они позволяют компьютерам понимать, интерпретировать и генерировать человеческий язык [2, 3].

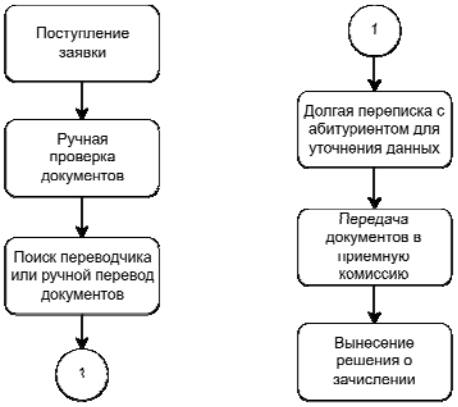


Рис. 1. Структурная схема классического процесса обработки заявок абитуриентов

С помощью модуля обработки естественного языка (NLP) (рис. 2) выделяется и анализируется первичный запрос пользователя. В области машинного обучения NLP посвящена именно тому, как компьютер анализирует естественный язык [3]. После этого запрос поступает на семантический анализатор, где в зависимости от контекста выделяется ключевая потребность абитуриента (при реакции на информационный запрос) или запускается сценарий сбора данных. Фильтр стоп-слов отсеивает спам-помехи и пропускает основную суть запроса для генерации ответа.

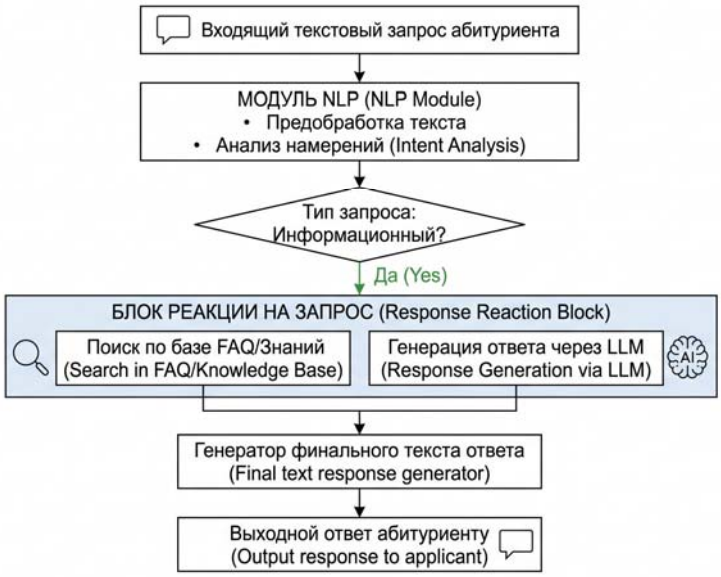


Рис. 2. Реакция на детектирование информационного запроса (выход с модуля NLP)

Интеллектуальная обработка документов с платформы (рис. 3) производится с помощью оптического распознавания символов (OCR) и нейросетевой архитектуры [4]. Процесс автоматического извлечения информации может быть разделен на несколько этапов, включая предварительную обработку текста (токенизацию) и выделение сущностей [2].

Рис. 3. Структурная схема блока интеллектуальной обработки документов с платформы

Серверная часть с помощью API больших языковых моделей (LLM) и векторной базы данных формирует персонализированный текстовый ответ. NLP охватывает не только распознавание слов, но и глубокое понимание контекста и намерения пользователя [2, 4]. Выходными данными рекомендательной системы (РС) питается интерфейс личного кабинета абитуриента. К выходу парсера документов подключен алгоритм верификации данных. Сигнал с выхода алгоритма верификации суммируется с правилами приема вуза и подается на вход системы скоринга (СС) (рис. 4). Интеллектуальный агент с частотой обновления в реальном времени формирует статус заявки.

Рис. 4. Выходные данные сумматора системы скоринга

Для верификации разработанных технических решений было проведено глубокое математическое моделирование функционирования комплексной интеллектуальной системы, объединяющей рекомендательный алгоритм и специализированную нейронную сеть платформы [4]. Валидация модели осуществлялась с использовани-

ем масштабного и репрезентативного массива исторических данных, содержащего деперсонализированные профили и документы иностранных граждан, успешно прошедших процедуру поступления в предыдущие периоды.

Результаты полученного моделирования убедительно демонстрируют, что спроектированный блок обработки обладает достаточной точностью и надежностью, чтобы полностью заменить трудоемкий ручной этап первичной верификации и проверки документов, значительно сокращая время обработки заявок, что отвечает современным концепциям трансформации высшего образования [1]. Реализованная пошаговая цепочка преобразования входных данных представляет собой сквозной технологический процесс, включающий последовательно: высокоточную оцифровку многоязычного текста модулем OCR, глубокий семантический анализ извлеченной информации для понимания контекста [3], автоматизированную маршрутизацию через фильтр распределения (ФР1), расчет дифференцированных рейтинговых показателей многокритериальной СС, финальную нейросетевую обработку блоком ФНК1 для формирования персонализированной рекомендации [4] и, наконец, генерацию контекстно-зависимого, персонализированного ответа абитуриенту с помощью встроенного чат-бота, что обеспечивает масштабируемость системы при минимальном участии человека.

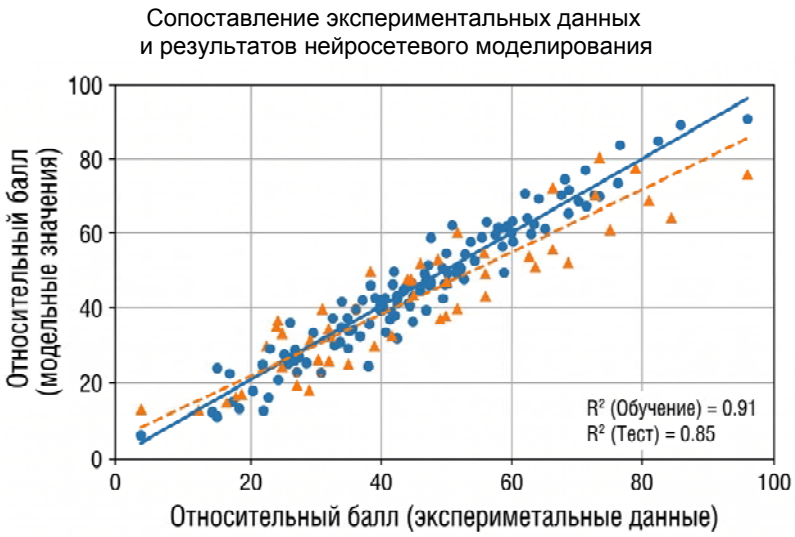


Рис. 5. Результаты верификации нейросетевой модели:
● – обучающая выборка (training data); ▲ – тестовая выборка (test data);
— – линейный тренд (обучение); - - - – линейный тренд (тест)

Рис. 5 наглядно показывает сопоставление экспериментальных (исходных) данных и модельных значений относительных баллов для обучающей и тестовой выборок. Высокие коэффициенты детерминации ($R^2_{(\text{обуч})} = 0{,}91$, $R^2_{(\text{тест})} = 0{,}85$) подтверждают адекватность модели и применимость разработанных алгоритмов для автоматизированной оценки абитуриентов.

Литература

1. Лукичев, П. М. Применение искусственного интеллекта в системе высшего образования / П. М. Лукичев, О. П. Чекмарев // Russian Journal of Innovation Economics. – 2023. – Т. 13. – С. 485–502.

2. Исаева, М. З. Методы и технологии обработки естественного языка / М. З. Исаева // Вестник ГГНТУ. – С. 136–138.
3. Цитульский, А. М. NLP-обработка естественных языков / А. М. Цитульский. – КиберЛенинка.
4. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – М. : Вильямс, 2019.

FROM TRADITIONAL TO INTELLIGENT: AN IOT-BASED INTELLIGENT MONITORING AND EVALUATION SYSTEM FOR DISSOLVED OXYGEN IN WATERSHED WATER ENVIRONMENT

Feng Naifan

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Scientific supervisor Yu. V. Kryshneu

Dissolved oxygen is a core indicator for assessing the health status of water environments in river basins. This paper explores the transition from traditional manual sampling to intelligent monitoring, proposes a dedicated monitoring system architecture for dissolved oxygen based on the Internet of Things, and utilizes statistical data analysis methods to quantitatively evaluate the dynamic changes of dissolved oxygen in water bodies and the impacts of environmental events.

Keywords: Internet of Things. dissolved oxygen, watershed monitoring. Difference-in-Differences model, statistical analysis, sensor nodes.

In the watershed ecosystem, the concentration of dissolved oxygen (DO) directly determines the survival status of aquatic organisms and the self-purification capacity of the water body. Traditional monitoring methods rely on manual regular inspections and titration analysis, which are not only time-consuming and laborious, but also suffer from significant spatial and temporal lags in data, making it difficult to capture diurnal fluctuations or sudden hypoxia events of dissolved oxygen. The transition to an intelligent monitoring system based on the Internet of Things (IoT) has become the key to addressing this bottleneck.

The intelligent dissolved oxygen monitoring system designed in this study comprises a sensing layer, a transmission layer, and a data analysis layer.

Block diagram of the intelligent dissolved oxygen monitoring system for river basins based on the Internet of Things (Fig. 1).

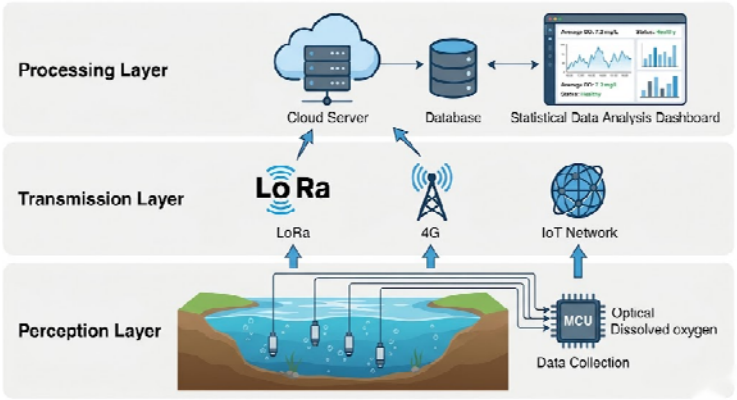


Fig. 1. Block diagram of the intelligent dissolved oxygen monitoring system for river basins based on the Internet of Things

At the sensing layer, the system deploys high-precision optical (or polarographic) dissolved oxygen sensor nodes. The microcontroller is responsible for collecting the analog signals from the sensors and removing high-frequency noise caused by water flow disturbances through a built-in low-pass filter (LPF). Subsequently, the data is transmitted back to the cloud database with low latency via a wireless communication module (such as LoRa/4G), forming a continuous time series of dissolved oxygen data.

To deeply mine these high-frequency monitoring data, this study introduces rigorous statistical data analysis methods at the cloud processing layer. Specifically, for specific environmental events within the basin (such as sudden rainfall, pollution discharge control, or ecological restoration projects), the system employs a Difference-in-Differences (DID) model for quantitative evaluation of policy or event effects.

Statistical analysis of dissolved oxygen data and evaluation process of the Difference-in-Differences (DID) model (Fig. 2).

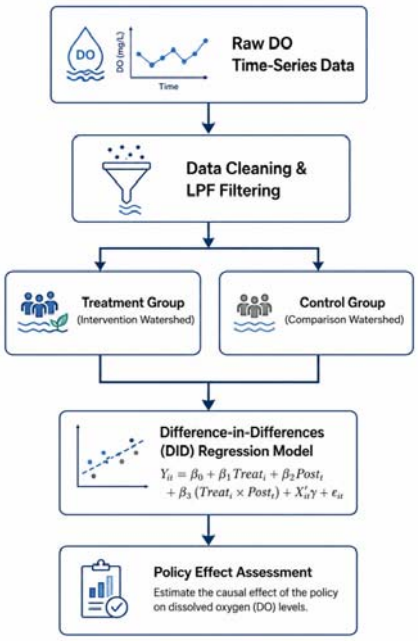


Fig. 2. Statistical analysis of dissolved oxygen data and evaluation process of the Difference-in-Differences (DID) model

Unlike simple mean comparison, the Difference-in-Differences (DID) model can effectively strip away the interference of time trends caused by changes in the natural environment. With the help of professional statistical analysis tools such as Stata, a systematic regression analysis is conducted on the dissolved oxygen panel data of the treatment group (regions affected by the event) and the control group (regions not affected). This method can accurately extract the net impact of a specific event on the dissolved oxygen concentration in water bodies (treatment effect).

The results of system simulation and empirical testing demonstrate that this intelligent monitoring architecture not only achieves round-the-clock automated collection of dissolved oxygen data, but also its embedded statistical analysis model can effectively identify key driving factors affecting water quality.

Dynamic changes in dissolved oxygen concentration before and after environmental events and DID effect analysis diagram (Fig. 3).

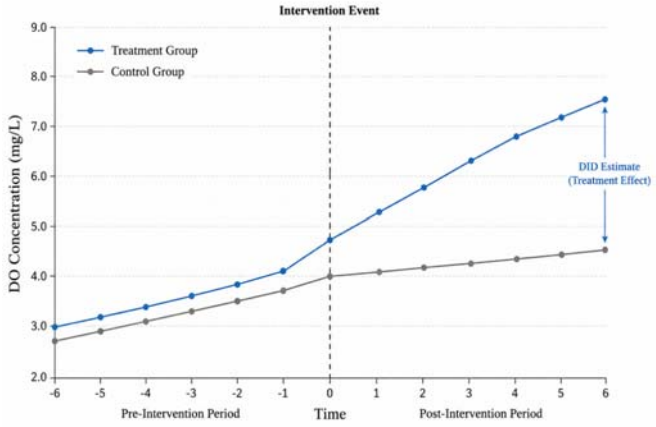


Fig. 3. Dynamic changes in dissolved oxygen concentration before and after environmental events and DID effect analysis diagram

In summary, this IoT monitoring system provides a high-timeliness and high-precision data foundation for the refined management of watershed water environment. Its analysis results can directly serve the formulation of ecological protection policies and the scientific assessment of soil and water environment.

References

1. Assessment and analysis of surface water environmental quality in counties within national key ecological functional zones / D. Zhai, X. Gao, H. Liu [et al.] // Environmental Monitoring in China. – 2022. – N 38 (4). – P. 56–64.
2. Assessing the effect of the joint governance of transboundary pollution on water quality: Evidence from China // Frontiers in Environmental Science. – 2022.
3. Dissolved oxygen level measurement in water using IoT and machine learning // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2025. – N 103 (4).

ПРОЕКТ УЧЕБНОГО ЦЕНТРА ПО ТЕХНОЛОГИЯМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УДАЛЕННЫХ СЕРВЕРОВ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ЛОКАЛЬНОГО ЗАПУСКА AI

А. В. Федорович, А. Э. Шлыков

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

Научные руководители: Ю. В. Крышнев, А. Е. Запольский

Рассмотрена концепция и архитектура учебного центра по технологиям искусственного интеллекта, объединяющего удаленные GPU-серверы и технологии локального развертывания AI-моделей. Предложена гибридная инфраструктурная модель, обеспечивающая практическое обучение работе с большими языковыми моделями, генеративным AI и системами машинного обучения при полном контроле над данными.

Ключевые слова: искусственный интеллект, большие языковые модели, локальный инференс, GPU-инфраструктура, MLOps, гибридная архитектура, учебный центр, open-source модели.

Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) и, в частности, больших языковых моделей (LLM), формирует устойчивый спрос на специалистов,

способных не только использовать готовые облачные сервисы, но и развертывать, настраивать и оптимизировать AI-системы самостоятельно [1]. Традиционные образовательные программы, ориентированные на теоретическую подготовку, не обеспечивают формирования практических компетенций работы с реальной вычислительной инфраструктурой.

Существующие подходы к обучению AI-технологиям имеют ряд ограничений: зависимость от проприетарных облачных API, отсутствие контроля над конфиденциальностью данных, высокая стоимость токенов при масштабном использовании и невозможность работы с моделями в условиях ограниченного сетевого доступа [2]. В связи с этим актуальной является задача создания образовательной среды, в которой обучающиеся получают опыт полного цикла работы с AI-моделями – от загрузки и квантования до развертывания в производственной инфраструктуре.

Целью данной работы является представление концепции и технической архитектуры учебного центра, реализующего гибридную модель обучения: локальные рабочие станции для начального знакомства с инструментами и удаленные GPU-серверы для ресурсоемких задач обучения и инференса.

Предлагаемая концепция основана на принципе «локальный запуск как базовый навык». Обучающиеся осваивают полный цикл работы с AI-моделями: выбор модели, квантование, развертывание, интеграция через API, тонкую настройку и эксплуатацию в нагруженной среде с применением методов эффективной адаптации [3]. Целевая аудитория центра включает разработчиков программного обеспечения, специалистов по данным, ML-инженеров, IT-менеджеров, студентов технических специальностей и предпринимателей, внедряющих AI в бизнес-процессы. Концептуальная схема учебного центра представлена на рис. 1.

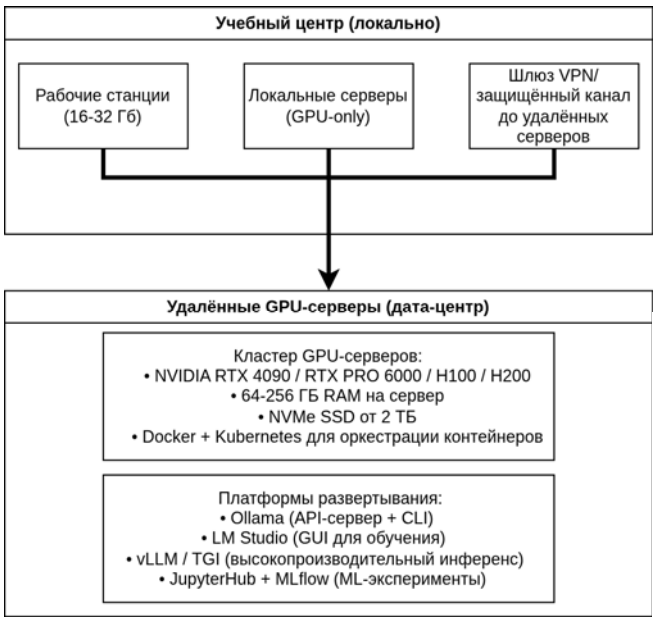


Рис. 1. Концептуальная схема гибридной архитектуры учебного центра

Ключевыми стратегическими целями проекта являются: формирование компетенций в области локального развертывания и тонкой настройки AI-моделей; обеспечение практического опыта работы с вычислительной инфраструктурой промыш-

ленного уровня; создание экосистемы для разработки AI-решений с соблюдением требований информационной безопасности; подготовка кадров без зависимости от зарубежных облачных провайдеров.

Технологический стек центра построен преимущественно на open-source решениях, что обеспечивает воспроизводимость, прозрачность и отсутствие лицензионных ограничений [5]. Основные компоненты локального запуска AI представлены в таблице.

Компоненты локального запуска AI и их назначение

Компонент	Назначение	Использование в обучении
Ollama [6]	CLI-инструмент для запуска LLM	Базовое знакомство с моделями
LM Studio	GUI-платформа	Обучение, тестирование моделей
llama.cpp	Низкоуровневый инференс	Оптимизация, квантование
vLLM [4]	Высокопроизводительный инференс	Нагруженное обслуживание
Docker [7]	Изолированные контейнерные среды	ML-Ops, воспроизводимость
OpenWebUI	Веб-интерфейс к локальным моделям	Создание чат-ботов

Взаимодействие между компонентами инфраструктуры реализуется по многоуровневой схеме (рис. 2).

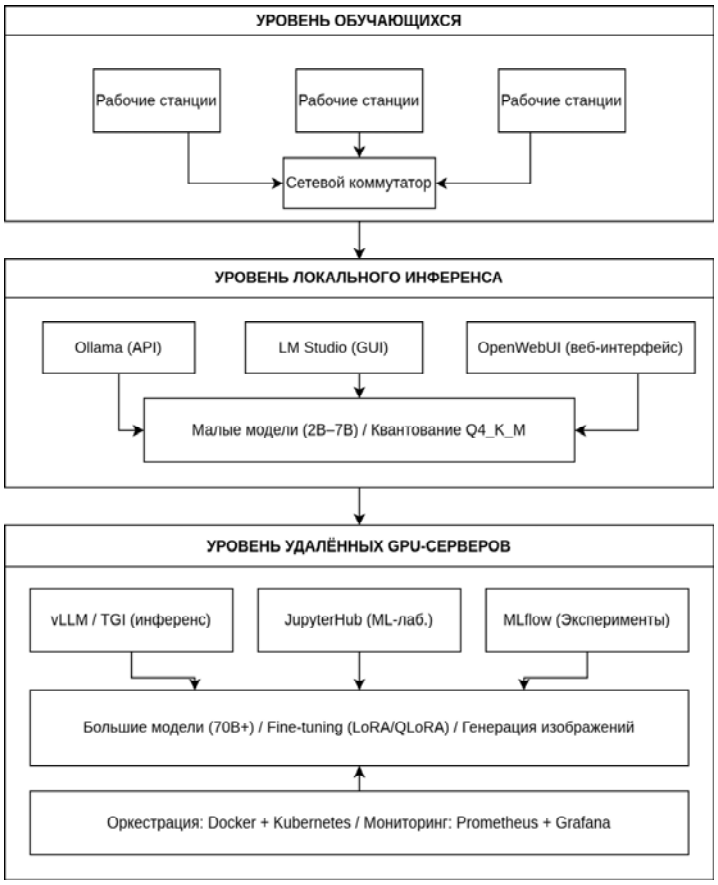


Рис. 2. Многоуровневая схема взаимодействия компонентов инфраструктуры

Обучающиеся подключаются к локальной сети центра через рабочие станции. Локальные серверы обеспечивают базовый инференс малых моделей (2–7 млрд параметров) для начального знакомства. Удаленные GPU-сер-веры предоставляют вычислительные мощности для тонкой настройки моделей, работы с большими моделями (70+ млрд параметров), параллельного инференса и генерации изображений [4].

Программный стек центра включает: операционные системы на базе ядра Linux; платформы развертывания моделей (Ollama, vLLM) [6, 4]; ML-фреймворки (PyTorch, Hugging Face Transformers) [5]; инфраструктурные инструменты (Docker, Kubernetes) [7]; системы мониторинга (Prometheus, Grafana).

Литература

1. Vaswani, A. Attention Is All You Need / A. Vaswani // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – URL: https://arxiv.org/abs/1706.03762 (date of access: 29.07.2026).
2. Touvron, H. Llama: Open and Efficient Foundation Language Models / H. Touvron. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2302.13971 (date of access: 29.07.2026).
3. Hu, E. J. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models / E. J. Hu. – 2021. – URL: https://arxiv.org/abs/2106.09685 (date of access: 29.07.2026).
4. Kwon, W. Efficient Memory Management for Large Language Model Serving with PagedAttention / W. Kwon // Proceedings of the 29th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP). – 2023. – URL: https://docs.vllm.ai (date of access: 29.07.2026).
5. Hugging Face – The AI community building the future. – URL: https://huggingface.co (date of access: 29.07.2026).
6. Ollama – Run large language models locally. – URL: https://ollama.com (date of access: 29.07.2026).
7. Docker – Accelerated Container Application Development. – URL: https://www.docker.com (date of access: 29.07.2026).

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

М. А. Проскуряков

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

Научный руководитель Ю. В. Крышнев

Рассмотрена разработанная автоматизированная система регистрации сварочных процессов.

Ключевые слова: дуговая сварка, регистратор, сварочные процессы, датчик температуры, контроль, технология Zigbee, база данных, программное обеспечение, сервер, речевой информатор.

В настоящее время производятся различные системы контроля режимов сварочных работ, при этом некоторые сварочные аппараты уже оснащены отдельными элементами такого контроля. Однако они не предполагают ведения базы данных, реализации удаленного контроля за процессом сварки и выполнения углубленного многофакторного анализа.

Разрабатываемая автоматизированная система регистрации сварочных процессов предназначена для контроля за соблюдением технологии при проведении сварочных работ, документального подтверждения качества каждого сварного стыка трубопровода, создания отчетов о работе электросварщика и сварочного оборудования, контроля за расходом материалов и ресурсов.

Она представляет собой программно-аппаратный комплекс, который состоит из регистратора, подключаемого к сварочному аппарату полуавтоматической или автоматической дуговой сварки любого производителя, автономных датчиков температуры околошовной зоны и программного обеспечения верхнего и нижнего уровня, обеспечивающего связь между приложениями и осуществляющего прием и хранение данных технологических процессов.

Регистратор сварочных процессов подключается между сварочным аппаратом и сварочными кабелями с заземлением и электрододержателем согласно рис. 1.

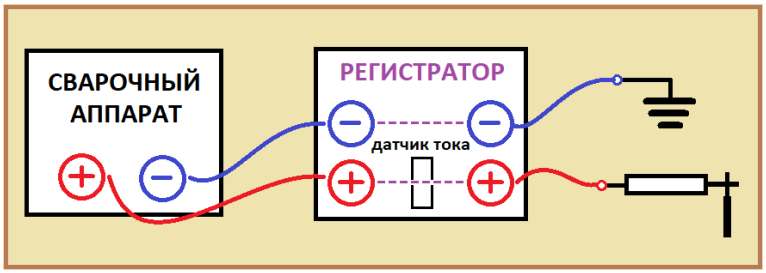


Рис. 1. Схема подключения регистратора сварочных процессов

Структурная схема разрабатываемого регистратора сварочных процессов представлена на рис. 2.

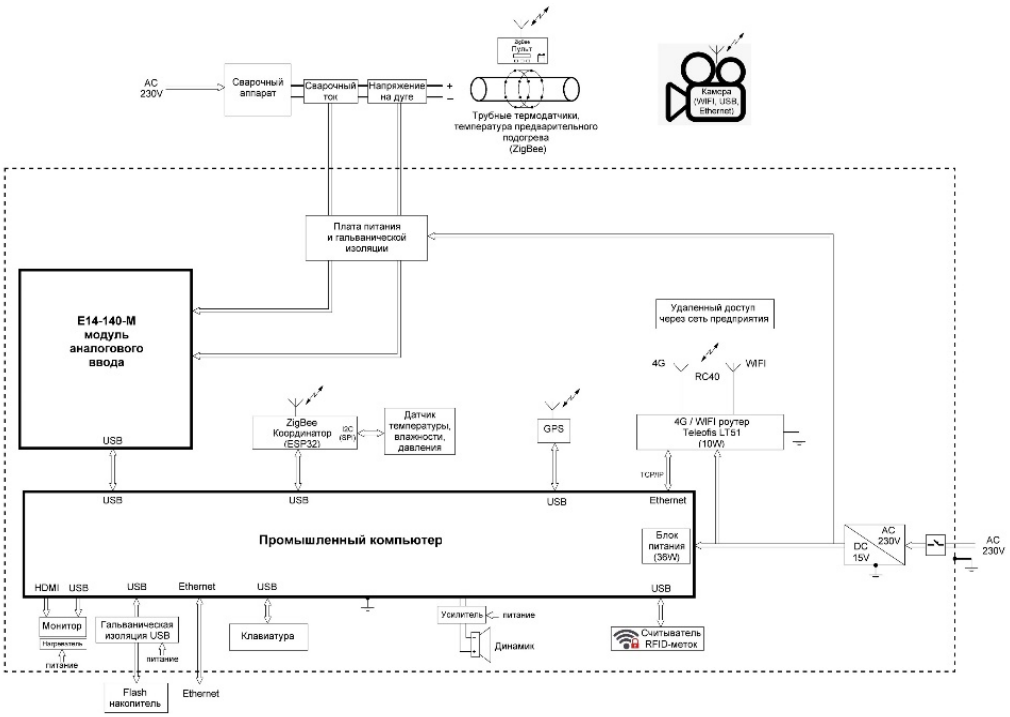


Рис. 2. Структурная схема регистратора сварочных процессов

Взаимодействие пользователя с системой может осуществляться по нескольким каналам. Устройство оснащено цветным дисплеем, на котором отображаются результаты измерений и вся остальная оперативная информация по режимам сварки, внешним условиям и результаты диагностирования.

Выбор заданий на сварку и ввод данных осуществляется через встроенную клавиатуру. Оперативное взаимодействие с системой во время проведения сварочных работ производится через пульт сварщика. Он оснащен двумя кнопками, звуковым и световым сигнализаторами.

Для оперативного информирования персонала и повышения оперативности работы с системой реализован речевой информатор, сообщающий информацию по текущим событиям, результатам самодиагностики и мониторинга. Речевой информатор реализован на базе динамической головки FR10WP с номинальным сопротивлением 4 Ом и мощностью 30 Вт, подключенной к звуковому интерфейсу персонального компьютера через усилитель мощности звуковой частоты класса *D*. Она обладает степенью защиты IP65 и диапазоном рабочих температур –40…+80 °C для открытого применения на автомобилях и кораблях.

Для измерения внешних условий проведения сварочных работ применяется модуль BME-280. Измеряются и записываются в архив результатов измерений следующие параметры:

– атмосферное давление;

– температура окружающей среды;

– влажность.

Электропитание всех узлов и блоков регистратора осуществляется через стабилизатор напряжения AC230V/DC15V.

Стабилизатор напряжения выполнен на микросхеме TPS631000DRLR [3], обеспечивающей работу датчика в диапазоне входного питающего напряжения 1,6–5,5 В. Измерительная часть реализована на источнике тока REF200AU [2] и аналого-цифровом преобразователе ADS1118IRUGT [1]. Для повышения энергоэффективности схемотехническая реализация предусматривает обесточивание источника тока. Реализована защита от установки аккумуляторной батареи неправильной полярностью.

Связь с автономными датчиками температуры осуществляется по технологии Zigbee, для чего к промышленному компьютеру подключен модуль ESP32-H2-DevKitM-1 в качестве координатора сети. Поддерживается до 8 автономных датчиков температуры. Принципиальная схема автономного датчика температуры приведена на рис. 3.

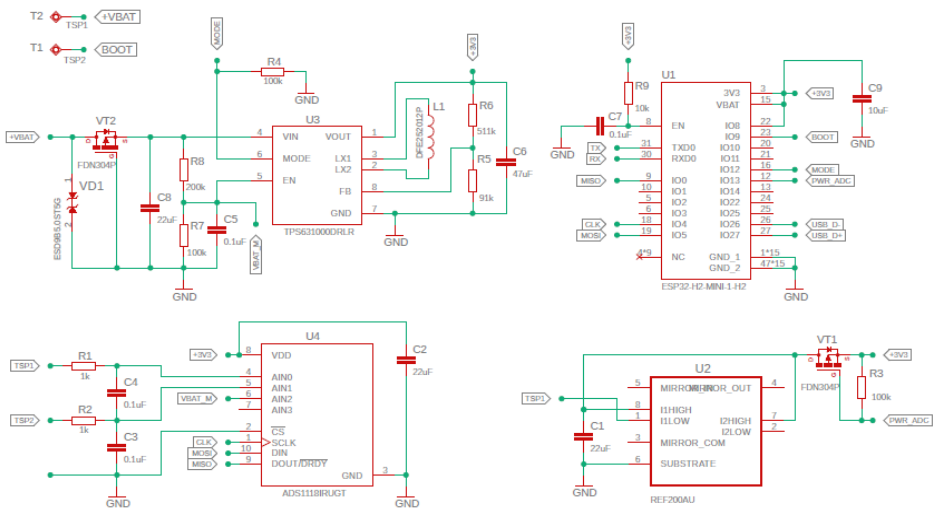


Рис. 3. Принципиальная схема автономного датчика температуры

В пульте сварщика используется тот же электронный модуль, что и в автономном датчике температуры, но с необходимыми доработками.

Литература

1. Datasheet: ADS1118IRUGT Ultra-Small, Low-Power, SPI™-Compatible, 16-Bit Analog-to-Digital Converter and Temperature Sensor with Internal Reference. – URL: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/466963/TI1/ADS1118IRUGT.html (date of access: 02.09.2025).
2. Datasheet: REF200 Dual Current Source and Current Sink. – URL: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/788153/TI1/REF200AU.html (date of access: 02.09.2025).
3. Datasheet: TPS631000 1.5-A Output Current, High Power Density Buck-Boost Converter. – URL: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1371736/TI/TPS631000DRLR.html (date of access: 02.09.2025).

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗРЕНИЯ

В. А. Горст

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

Научный руководитель А. Е. Запольский

Рассмотрены особенности человеческого зрения, связанные с инерционностью, а также механизмы работы дневного и ночного зрения человека.

Ключевые слова: свет, цвет, фоторецепторы, инерционность человеческого зрения, ШИМ-модулятор.

Глаз человека содержит два типа светочувствительных клеток (фоторецепторов): высокочувствительные палочки и менее чувствительные колбочки. Палочки функционируют в условиях относительно низкой освещенности и отвечают за действие механизма ночного зрения, ограниченного участием белого, серого и черного цветов. Колбочки работают при более высоких уровнях освещенности, чем палочки. Они ответственны за механизм дневного зрения, обеспечивают цветовое зрение.

Инерция зрения представляет собой неспособность сетчатки отвечать на частые колебания яркости света и сигнализировать о них. Если свет включается и выключается сначала медленно, а затем все чаще, мы будем видеть мелькание света до тех пор, пока его частота не достигнет приблизительно 30 вспышек в секунду, после чего он будет казаться непрерывным. На рис. 1 представлены графики светочувствительности колбочек человеческого глаза, а именно *S*, *M*, *L*.

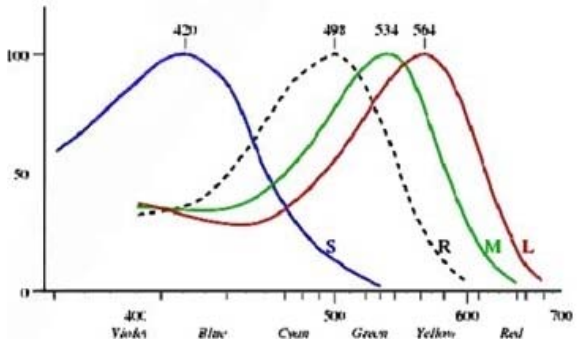


Рис. 1. Нормализованные графики светочувствительности колбочек человеческого глаза *S*, *M*, *L*

В сетчатке глаза человека есть три вида колбочек, максимумы чувствительности которых приходятся на красный, зеленый и синий участки спектра. Очень сильный свет возбуждает все 3 типа рецепторов, и потому воспринимается как излучение слепяще-белого цвета (эффект метамерии). Равномерное раздражение всех трех элементов соответствует средневзвешенному дневному свету. Свет с разной длиной волны по-разному стимулирует разные колбочки. В таблице указаны виды колбочек, а также воспринимаемые человеческим глазом длины волн каждой из них.

Виды колбочек

Тип колбочек	Обозначение	Воспринимаемые длины волн	Максимум чувствительности
S	β	400–500 нм	420–440 нм
M	γ	450–630 нм	534–555 нм
L	ρ	500–700 нм	564–580 нм

На рис. 2 изображен ШИМ-генератор на компараторе LM393, который формирует прямоугольные импульсы с регулируемой скважностью за счет сравнения пилообразного сигнала с опорным напряжением. Питание подается через узел с полевым транзистором *Q*3 и диодами *D*1, *D*2, которые выполняют защиту и коммутацию. Первый компаратор *X*1 вместе с резисторами *R*2, *R*3, *R*4 создает генератор с положительной обратной связью, формируя гистерезис, а конденсатор *C*1 через цепь *R*6 и диод *D*3 периодически заряжается и разряжается, из-за чего на нем возникает пилообразное напряжение, частота которого определяется значениями *C*1 и сопротивлений. Далее формируется регулируемое опорное напряжение с помощью делителя на *R*8, *R*9, *R*10 и потенциометра *RV*1, при этом транзисторы *Q*1 и *Q*2 участвуют в усилении и формировании управляющего сигнала, стабилизируя и изменяя уровень сравнения. Второй компаратор *X*2 сравнивает пилообразное напряжение с этим регулируемым уровнем и переключает свое состояние в зависимости от того, какое из напряжений больше; в результате на выходе формируется ШИМ-сигнал, у которого частота определяется генератором, а скважность изменяется положением потенциометра. Резистор *R*11 подтягивает выход компаратора, так как у LM393 открытый коллектор, и в итоге схема позволяет плавно регулировать мощность, подаваемую на нагрузку, изменяя длительность импульсов при постоянной частоте.

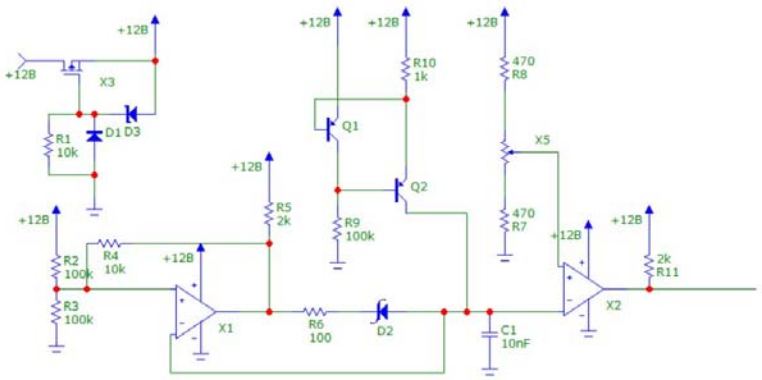


Рис. 2. ШИМ-генератор для контроля трех цветов подсветки (*R*, *G*, *B*)

ШИМ-генератор на компараторе LM393 формирует импульсы с регулируемой скважностью за счет сравнения пилообразного сигнала с опорным напряжением, изменяемым потенциометром, что позволяет плавно управлять мощностью нагрузки при постоянной частоте. С его помощью можно управлять 12-вольтовой *RGB*-лентой, но напрямую только одним каналом (одним цветом). Для полноценного управления всей *RGB*-лентой потребуется три таких канала или доработка схемы с тремя независимыми ШИМ-сигналами и силовыми ключами (обычно – *MOSFET*) для каждого цвета.

Литература

1. Средства отображения информации : практикум по выполнению лабораторных работ по одноименной дисциплине для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / сост.: В. А. Хананов, В. В. Щуплов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 89 с. – URL: https://elib.gstu.by.

РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Т. А. Ракицкий

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

Научный руководитель Ю. В. Крышнев

Рассмотрены особенности применения симплекс-метода для решения задач линейного программирования. Представлена математическая постановка задачи оптимизации производственного процесса предприятия промышленной электроники, рассмотрен алгоритм построения симплекс-таблиц и получения оптимального плана производства.

Ключевые слова: линейное программирование, симплекс-метод, симплекс-таблица, оптимизация производства, промышленная электроника, математическое моделирование, исследование операций.

Решение прикладных задач оптимизации производства электронной техники производится с помощью симплекс-метода.

Нахождение оптимального плана симплексным методом включает следующие этапы:

1. Приведение задач линейного программирования (ЗЛП) к канонической форме.
2. Нахождение опорного плана.
3. Составление симплекс-таблицы.
4. Выяснение наличия хотя бы одного положительного числа Δj. Если таких нет, то найденный план оптимален. Если же среди чисел Δj имеются положительные, то либо устанавливают неразрешимость задачи, либо переходят к новому опорному плану.
5. Нахождение разрешающих столбца и строки. Разрешающий столбец определяется наибольшим по абсолютной величине положительным числом Δj, а разрешающая строка – минимальным из отношений компонент столбца вектора A_0 к положительным компонентам разрешающего столбца.

6. Определение положительных компонент нового опорного плана, коэффициентов разложения векторов A_i по векторам нового базиса и числа Δ_0 и Δj. Все эти числа записываются в новой симплекс-таблице.

7. Проверка найденного опорного плана на оптимальность. Если план не оптимален и необходимо перейти к новому опорному плану, то возвращаются к этапу *4*, а в случае получения оптимального плана или установления неразрешимости процесса решения задачи, заканчивается.

Для осуществления контроля за правильностью работы с симплекс-таблицей необходимо проверить, что:

1) компоненты вектора A_0 неотрицательны;

2) оценки при базисных векторах равны нулю;

3) последующие значения целевой функции меньше предыдущих.

Приведем пример. Для производства электронных модулей предприятие промышленной электроники использует необходимые ресурсы. Нормы затрат ресурсов на один модуль данного вида, прибыль от реализации одного модуля и общее количество имеющихся ресурсов каждого вида приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Ресурсы	**Нормы затрат на одно изделие**		**Общее количество ресурсов**
	Модуль управления шаговым двигателем	**Модуль интерфейсной обработки аналоговых сигналов**	
Печатные платы	0,2	0,1	40
Электронные компоненты	0,1	0,3	60
Трудоемкость сборки и программирования, чел.-ч	1,2	1,5	372,4
Прибыль от реализации одного модуля, руб.	6	8	–

Необходимо определить, сколько модулей каждого вида следует изготовлять, чтобы прибыль от их реализации была максимальной.

Решение

1. Прежде чем применять симплекс-метод, необходимо задачу формализовать (построить математическую модель) и привести к канонической форме.

Итак, предприятию промышленной электроники необходимо спланировать объем производства модулей управления шаговым двигателем и модулей интерфейсной обработки аналоговых сигналов так, чтобы максимизировать прибыль. Мы имеем следующие переменные: x_1 – количество модулей управления шаговым двигателем; x_2 – количество модулей интерфейсной обработки аналоговых сигналов.

Суммарная прибыль от производства модулей равна:

$$Z(x) = 6x_1 + 8x_2.$$

Целью предприятия является определение среди всех допустимых значений x_1 и x_2 таких, которые максимизируют суммарную прибыль, т. е. целевую функцию $Z(x)$.

Ограничения, которые налагаются на x_1 и x_2:

1) объем производства модулей не может быть отрицательным, следовательно, $x_1, x_2 \geq 0$;

2) нормы затрат печатных плат и электронных компонентов на модули не могут превосходить максимально возможный запас, а трудоемкость не может быть больше суммарно, чем 372,4 чел.-ч. Отсюда вытекает система ограничений:

$$\begin{cases} 0{,}2x_1 + 0{,}1x_2 \leq 40; \\ 0{,}1x_1 + 0{,}3x_2 \leq 60; \\ 1{,}2x_1 + 1{,}5x_2 \leq 372{,}4. \end{cases}$$

Таким образом, математическая модель задачи будет иметь вид:

$$\begin{cases} 0{,}2x_1 + 0{,}1x_2 \leq 40; \\ 0{,}1x_1 + 0{,}3x_2 \leq 60; \\ 1{,}2x_1 + 1{,}5x_2 \leq 372{,}4; \end{cases}$$

$$x_1, x_2 \geq 0;$$

$$Z(x) = 6x_1 + 8x_2 \to \max.$$

2. Далее необходимо привести ЗЛП к канонической форме:

$$\begin{cases} 0{,}2x_1 + 0{,}1x_2 \leq 40; \\ 0{,}1x_1 + 0{,}3x_2 \leq 60; \\ 1{,}2x_1 + 1{,}5x_2 \leq 372{,}4; \end{cases}$$

$$x_1, x_2 \geq 0;$$

$$Z^*(x) = -6x_1 - 8x_2 \to \min.$$

3. Теперь можно приступать к применению симплекс-метода для нахождения решения данной задачи. Следуя алгоритму, находится опорный план, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Опорный план

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_0
0,2	0,1	1	0	0	40
0,1	0,3	0	1	0	60
1,2	1,5	0	0	1	372

4. Строим симплекс-таблицу (табл. 3).

Таблица 3

Симплекс-таблица

			c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
			–6	–8	0	0	0
$A_б$	$C_б$	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
A_3	0	40	0,2	0,1	1	0	0
A_4	0	60	0,1	0,3	0	1	0
A_5	0	372,4	1,2	1,5	0	0	1
		Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5
		0	6	8	0	0	0

5. Следуя п. 3 алгоритма симплекс-метода, выясняем наличие хотя бы одного положительного числа Δ_j. Их в таблице два: $\Delta_1 = 6$ и $\Delta_1 = 8$. Максимальное из них – 8, значит, столбец A_2 будет разрешающим. Определим разрешающую строку, поделив элементы столбца A_0 на элементы столбца A_2, и выберем минимальный результат деления (табл. 4).

Таблица 4

Минимальный результат деления

A_0/A_2	
400	
200	min
248,26667	

6. Определив разрешающий элемент, переходим к новому опорному плану и отмечаем, что требуется еще одна итерация для нахождения нового опорного плана (табл. 5), так как среди Δ_j вновь есть положительный элемент $\Delta_1 = 3{,}3$.

Таблица 5

Итерация для нахождения нового опорного плана

			c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	
			–6	–8	0	0	0	
$A_б$	$C_б$	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_0/A_1
A_3	0	20	0,17	0	1	–0,3	0	120
A_4	-8	200	0,33	1	0	3,3	0	600
A_5	0	72,4	0,7	0	0	–5,0	1	103,4
		Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	
		–1600	3,33	0	0	–26,67	0	

min

7. Определив разрешающий элемент, переходим к новому опорному плану (табл. 6).

Таблица 6

Новый опорный план

			c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
			–6	–8	0	0	0
$A_б$	$C_б$	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
A_3	0	2,4	0	0	1	0,9	–0,2
A_4	–8	166	0	1	0	5,6	–0,5
A_5	–6	103	1	0	0	–7,1	1,4
		Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5
		–1944	0	0	0	–2,9	–4,8

Как видно, в табл. 6 найдено оптимальное решение. Для контроля проверено, что значения Δ_j при базисных векторах равны нулю, $\Delta_j \le 0$ и целевая функция, т. е. значение Δ_0, уменьшалась.

Полученный ответ задачи: $x_1 = 103$ (шт.) – модули управления шаговым двигателем, $x_2 = 166$ (шт.) – модули интерфейсной обработки аналоговых сигналов; $Z(x) = (-1)Z^*(x) = 1944$ руб. – максимальная прибыль.

Литература

1. Методы оптимизации. Линейное программирование : учеб. пособие / В. В. Белага, И. А. Булякова, Е. Ю. Кирпичева, О. А. Крейдер. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2016. – 137 с.
2. Методы оптимизации: основы линейного программирования : учеб.-метод. пособие / Е. Д. Незнахина, Ю. Ю. Огородников ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2025. – 128 с.
3. Линейное программирование: симплекс-метод и двойственность : учеб. пособие / О. В. Болотникова, Д. В. Тарасов, Р. В. Тарасов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 84 с.
4. Линейное программирование : метод. пособие для студентов специальности 1-31 03 01-03 «Математика (экономическая деятельность)» / В. И. Бахтин, И. А. Иванишко, А. В. Лебедев, О. И. Пиндрик. – Минск : БГУ, 2012. – 39 с.
5. Банди, Б. Основы линейного программирования : пер. с англ. / Б. Банди. – М. : Радио и связь, 1989. – 176 с. : ил.
6. Линейное программирование : учеб. пособие для самостоятельной работы студентов. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 50 с.
7. Математическое программирование: теория и методы : учеб. пособие / Н. В. Гредасова, А. Н. Сесекин, А. Ф. Шориков, М. А. Плескунов ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 200 с.

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТАЛЛОДЕТЕКТОР ДЛЯ КОРМОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ: ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Д. С. Колесник, Ив. Иг. Суторьма

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

Научные руководители: В. А. Карпов, Л. А. Захаренко

Рассмотрены принцип действия и схемотехническая реализация индукционного металлодетектора рамного типа, предназначенного для защиты режущего аппарата кормоуборочного комбайна от попадания металлических предметов.

Ключевые слова: металлодетектор, индукционный датчик, взаимоиндукция, кормоуборочный комбайн, дифференциальное включение обмоток, фазочувствительный выпрямитель, помехоустойчивость.

Современная кормоуборочная техника предполагает высокую производительность подбора и измельчения кормовой массы. Попадание в измельчающий барабан постороннего металлического предмета приводит к выходу узла из строя и вынужденному простою дорогостоящей сезонной техники, поэтому задача обнаружения металла в потоке кормовой массы до измельчителя является актуальной [1].

Применяемые в настоящее время металлодетекторы для защиты рабочих органов кормоуборочных комбайнов чаще всего построены на чувствительных элементах в виде индукционных катушек, размещенных на системе постоянных магнитов [2, 3]. Такому решению присущ ряд недостатков: неравномерность чувствительности по ширине контролируемой зоны, зависимость выходного сигнала от скорости прохождения ферромагнитного тела (т. е. от производительности комбайна) и необходимость использования дорогостоящих немагнитных материалов и сварных технологий при изготовлении формующих вальцов.

Для устранения перечисленных недостатков предложен индукционный датчик рамного типа (рис. 1), устанавливаемый перед вальцевой системой, что позволяет отказаться от дорогостоящих материалов и технологий и увеличить время, необходимое для срабатывания системы защиты.

Рис. 1. Рамочный индукционный датчик металлодетектора

Датчик содержит одну возбуждающую обмотку $L1$ (5 витков, провод ПЭТВ-2 диаметром 0,8 мм) и две встречно включенные сигнальные обмотки $L2$ и $L3$ (по 5 витков, провод ПЭТВ-2 диаметром 0,2 мм). Экспериментально определены их параметры на частоте 10 кГц: $L1$ = 47,1 мкГн, $R1$ = 0,74 Ом; $L2$ = 44,8 мкГн, $R2$ = 0,82 Ом; $L3$ = 45,8 мкГн, $R3$ = 0,79 Ом. При отсутствии металлического предмета встречное включение сигнальных обмоток обеспечивает нулевой суммарный сигнал за счет равенства коэффициентов связи между возбуждающей и каждой из сигнальных обмоток. Попадание ферромагнитного тела в зону действия датчика изменяет коэффициент связи одной из обмоток относительно другой, вследствие чего на выходе появляется сигнал рассогласования, пропорциональный степени этого изменения и не зависящий от скорости прохождения предмета через зону контроля.

Обработка сигнала датчика выполняется по функциональной схеме, приведенной на рис. 2.

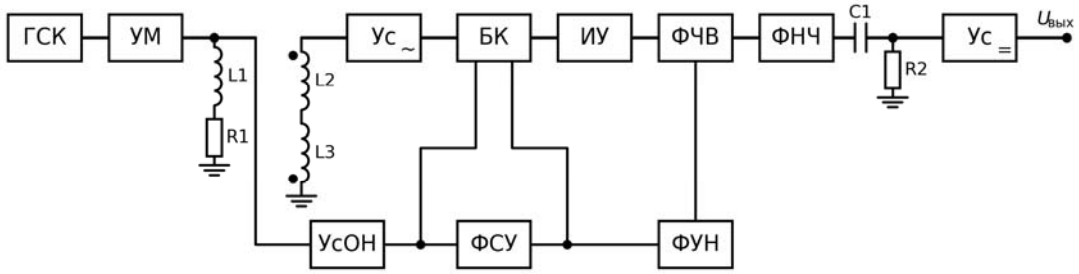


Рис. 2. Функциональная схема обрабатывающего устройства металлодетектора

Генератор синусоидальных колебаний (ГСК) формирует стабильное по амплитуде и частоте (10 кГц) напряжение возбуждения; стабилизация амплитуды обеспечивается встречно-параллельным включением диодов в цепи обратной связи. Усилитель мощности (УМ) на микросхеме TDA2030 согласует генератор с низкоомной нагрузкой обмотки $L1$. Сигнал с сигнальных обмоток поступает на усилитель Ус и блок компенсации (БК), выполненный на операционном усилителе с параллельной отрицательной обратной связью; регулировкой потенциометров БК достигается минимальное (в идеале нулевое) напряжение на выходе при отсутствии металла. Далее сигнал рассогласования выделяется избирательным усилителем (ИУ), настроенным на частоту генератора, и поступает на фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), реализованный на микросхеме К590КН4. Опорное напряжение для ФЧВ формируется фазосдвигающим устройством (ФСУ) и формирователем управляющих напряжений (ФУН). Постоянная составляющая выделяется трёхзвенным фильтром нижних частот (ФНЧ) и усиливается выходным усилителем постоянного напряжения на микросхеме LM324.

Расчет основных узлов схемы выполнен исходя из рабочей частоты генератора 10 кГц: при емкости времязадающих конденсаторов $C1 = C2 = 4{,}7$ нФ сопротивления частотозадающей цепи составили $R \approx 3{,}39$ кОм, коэффициент отрицательной обратной связи принят $\beta < 1/3$ ($R3 = 20$ кОм, $R4 = 40$ кОм). В блоке обработки использованы операционные усилители К544УД2 (формирователь управляющих напряжений), ОР37 (усилители напряжения рассогласования и опорного напряжения) и LM324 (выходной усилитель постоянного напряжения), параметры которых по входным токам и напряжениям смещения обеспечивают требуемую точность формирования и обработки сигнала.

Использование синхронного детектирования с опорным сигналом от того же генератора, что и возбуждение датчика, в сочетании с дифференциальным включением сигнальных обмоток обеспечивает высокую помехоустойчивость схемы и позволяет выделять полезный сигнал на фоне значительных электромагнитных помех, создаваемых работающими электродвигателями и вращающимися вальцами комбайна.

Таким образом, разработанные конструкция индукционного датчика и схемотехническое решение обрабатывающего устройства обеспечивают независимость чувствительности металлодетектора от скорости прохождения кормовой массы и отказ от дорогостоящих материалов и технологий изготовления.

Литература

1. Патент BY 7438, МПК G 01R 33/02, A 01D 75/00 (2006.01). Металлодетектор для кормоуборочной техники : № u 20101086 ; заявлено 31.12.2010 : опубл. 30.06.2011 / Карпов В. А., Соболев Д. В., Ростокина О. М. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – URL: https://elib.gsty.by/handle/220612/231 (дата обращения: 10.07.2026).
2. Соболев, Д. В. Металлодетектор для защиты рабочих органов кормоуборочной техники / Д. В. Соболев ; науч. рук. В. А. Карпов // Творчество юных – 2012 : сб. науч. ст. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2012. – С. 163–166.
3. Соболев, Д. В. Металлодетектор на основе элементов Холла / Д. В. Соболев ; науч. рук. В. А. Карпов // Творчество юных – 2013 : сб. науч. ст. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2013. – С. 180–183.
4. Карпов, В. А. Преобразовательная техника : метод. указания к курсовому проектированию по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / В. А. Карпов, О. М. Ростокина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 43 с.

СХЕМАТЭХНІЧНАЯ РЭАЛІЗАЦЫЯ ВУЗЛОЎ ІНТЭРФЕЙСНАГА СПАЛУЧЭННЯ І БЛОКА СІЛКАВАННЯ ІНТЭЛЕКТУАЛЬНАЙ ЛІФТАВОЙ ПАНЭЛІ

Дз. А. Рагавы

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

Навуковыя кіраўнікі: Дз. А. Літвінаў, Ю. В. Крышнеў

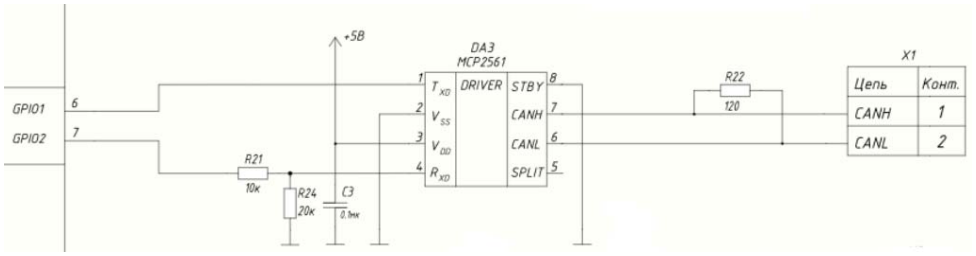
Разгледжана схематэхнічная рэалізацыя вузлоў інтэрфейснага спалучэння па стандартах RS-485 і CAN, а таксама блока сілкавання інтэлектуальнай ліфтавой панэлі з сістэмай галасавога кіравання на базе мікракантролера ESP32-S3.

Ключавыя словы: ліфтавая панэль, інтэрфейс RS-485, інтэрфейс CAN, MCP2561, MAX485, блок сілкавання, імпульсны пераўтваральнік MC33063, стабілізатар LM1117, ESP32-S3.

Інтэграцыя інтэлектуальных панэляў кіравання з існуючымі сістэмамі дыспетчарызацыі ліфтавога абсталявання патрабуе прымянення прамысловых інтэрфейсаў перадачы даных, устойлівых да электрамагнітных перашкод кабіны і шахты ліфта. Найбольш распаўсюджанымі ў ліфтавой аўтаматыцы з'яўляюцца дыферэнцыяльныя інтэрфейсы RS-485 і CAN, якія забяспечваюць надзейную перадачу даных на значныя адлегласці пры высокім узроўні прамысловых перашкод. Не менш важнай задачай пры распрацоўцы ўбудаванай прылады з'яўляецца пабудова блока сілкавання, які пераўтварае напружанне бартавой сеткі ліфтавога абсталявання ў напружанні, неабходныя для сілкавання мікракантролера і перыферыйных вузлоў.

Разгляданыя вузлы з'яўляюцца часткай інтэлектуальнай ліфтавой панэлі з сістэмай галасавога кіравання, пабудаванай на базе мікракантролера ESP32-S3-WROOM-1U-N16R8 і забяспечваючай распазнаванне галасавых каманд выбару паверха. Абмен даных з кантролерам ліфта ажыццяўляецца па інтэрфейсах CAN або RS-485, а сілкаванне прылады вырабляецца ад бартавой сеткі напружаннем 24 В.

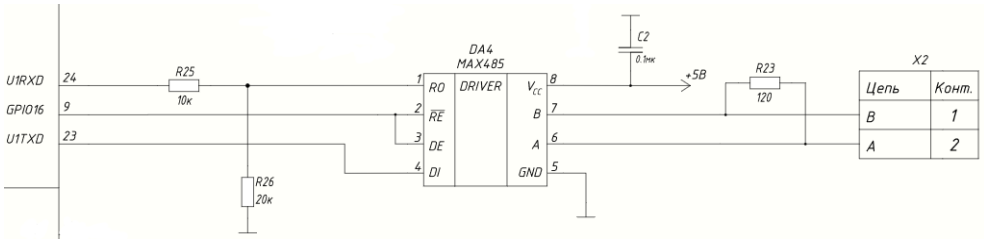
Для арганізацыі інтэрфейсу CAN выкарыстаны трансівер MCP2561, які пераўтварае лагічныя ўзроўні мікракантролера ў дыферэнцыяльныя сігналы ліній CANH і CANL. Падключэнне мікрасхемы да мікракантролера ESP32-S3-WROOM-1U-N16R8 выконваецца па лініях TXD і RXD (мал. 1).



Мал. 1. Прынцыповая схема ўключэння CAN-трансівера MCP2561

Паколькі выходны сігнал прыёмніка трансівера мае ўзровень 5 В, а максімальна дапушчальнае напружанне на ўваходзе крышталя мікракантролера абмежавана значэннем 3,6 В, для ўзгаднення ўзроўняў ужыты рэзістыўны дзельнік напружання *R*21–*R*24. Разлік напружання на ўваходзе мікракантролера выконваецца па формуле дзельніка. Разлік дае значэнне $U_{\text{вх.мк}} \approx 3{,}33$ В, што задавальняе ўмове $U_{\text{вх.мк}} < U_{\text{макс.доп}} = 3{,}6$ В. Рэзістар супраціўленнем 120 Ом, уключаны паміж лініямі *CANH* і *CANL*, забяспечвае ўзгадненне хвалевага супраціўлення лініі сувязі і памяншае адлюстраванні сігналу пры перадачы даных.

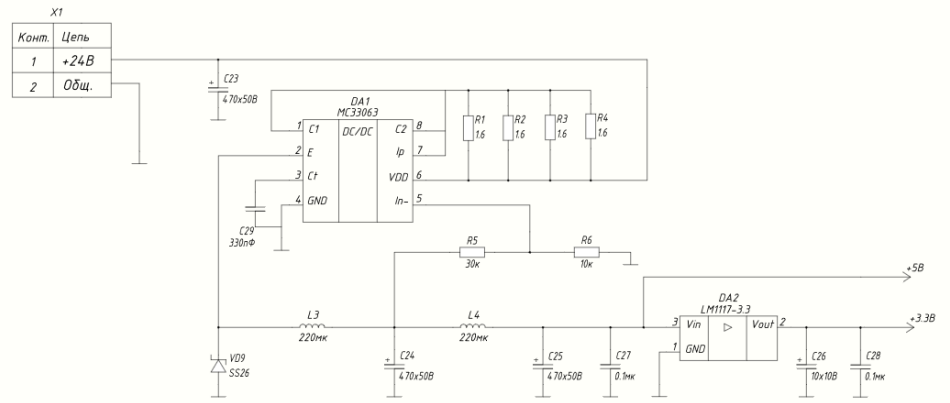
Для арганізацыі інтэрфейсу RS-485 ужыты трансівер MAX485, які падключаецца да мікракантролера праз інтэрфейс UART. Кіраванне напрамкам перадачы ажыццяўляецца аб'яднанымі вывадамі *DE* і *RE*, а дыферэнцыяльная перадача даных выконваецца па лініях *A* і *B* (мал. 2).



Мал. 2. Прынцыповая схема ўключэння драйвера RS-485 MAX485

Сілкаванне мікрасхемы MAX485 ажыццяўляецца напружаннем 5 В; для падаўлення высокачастотных перашкод прадугледжаны развязвальны кандэнсатар. Узгадненне лініі сувязі, як і ў выпадку інтэрфейсу CAN, забяспечваецца тэрмінальным рэзістарам супраціўленнем 120 Ом, уключаным паміж лініямі *A* і *B*. Прымяненне дыферэнцыяльнай перадачы даных у абодвух інтэрфейсах забяспечвае высокую ўстойлівасць да электрамагнітных наводак, характэрных для ліфтавога абсталявання.

Для сілкавання прылады ад бартавой сеткі ліфтавога абсталявання (24 В пастаяннага току) у распрацоўцы выкарыстаны двухкаскадны блок сілкавання (мал. 3). Першы каскад пабудаваны на імпульсным паніжальным пераўтваральніку на аснове мікрасхемы MC33063, якая забяспечвае пераўтварэнне ўваходнага напружання 24 В у стабілізаванае напружанне 5 В. Мікрасхема змяшчае ўнутраную крыніцу апорнага напружання 1,25 В, кампаратар, генератар і магутны выходны пераключальны транзістар; максімальны ток пераключэння складае 1,5 А, частата генерацыі – не больш за 100 кГц.



Мал. 3. Прынцыповая схема блока сілкавання

Датчык току пераўтваральніка выкананы ў выглядзе чатырох паралельна ўключаных рэзістараў *R*1–*R*4 супраціўленнем 1,6 Ом, часазадаючы кандэнсатар *Ct* прыняты роўным 330 пФ. Дросель *L*4 індуктыўнасцю 220 мкГн разам з кандэнсатарам фільтра С25 (470 мкФ) забяспечвае згладжванне пульсацый выходнага напружання. Другі каскад пабудаваны на лінейным стабілізатары LM1117-3.3, які паніжае напружанне 5 В да 3,3 В, неабходных для сілкавання мікракантролера, OLED-дысплэя і лічбавага мікрафона. Прымяненне імпульснага пераўтваральніка на першым каскадзе замест лінейнага стабілізатара дазваляе істотна павысіць каэфіцыент карыснага дзеяння блока сілкавання і знізіць цеплавыдзяленне пры значным перападзе ўваходнага і выходнага напружанняў (24 В → 5 В), тады як лінейны стабілізатар другога каскада забяспечвае нізкі ўзровень пульсацый і перашкод, неабходны для стабільнай працы аналагава-лічбавых вузлоў прылады.

Выкарыстанне дыферэнцыяльных інтэрфейсаў RS-485 і CAN з узгаднальнымі рэзістарамі і дзельнікамі напружання, а таксама двухкаскаднага блока сілкавання на аснове імпульснага і лінейнага стабілізатараў забяспечвае ўстойлівую перадачу даных і стабільнае сілкаванне вузлоў інтэлектуальнай ліфтавой панэлі ва ўмовах павышанага ўзроўню электрамагнітных перашкод, характэрных для ліфтавога абсталявання. Прапанаваныя схематэхнічныя рашэнні могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы іншых убудаваных прылад, інтэграваных у прамысловыя сістэмы аўтаматызацыі па інтэрфейсах RS-485 і CAN.

Літаратура

1. Микросхема ESP32-S3-WROOM-1U-N16R8. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf/ (дата обращения: 20.03.2026).
2. MCP2561/2 High-Speed CAN Transceiver. – URL: https://www.microchip.com/en-us/product/mcp2561 (date of access: 20.03.2026).

3. MAX481/483/485/487–491/1487 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers. – URL: https://www.analog.com/en/products/max485.html (date of access: 20.03.2026).
4. MC33063A, MC34063A 1.5-A Peak Boost/Buck/Inverting Switching Regulators. – URL: https://www.ti.com/product/MC33063A (date of access: 20.03.2026).
5. LM1117 800-mA Low-Dropout Linear Regulator. – URL: https://www.ti.com/product/LM1117 (date of acces: 20.03.2026).

ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНЫЯ ДАСЛЕДАВАННІ І НАПРАМКІ ЎДАСКАНАЛЕННЯ ІНДУКЦЫЙНАГА МЕТАЛАДЭТЭКТАРА КАРМАЗБІРАЛЬНАГА КАМБАЙНА

Дз. С. Калеснік, Ів. Іг. Сутарма

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

Навуковыя кіраўнікі: У. А. Карпаў, Л. А. Захаранка, Ю. В. Крышнеў

Прадстаўлены методыка і вынікі натурных выпрабаванняў макетнага ўзору індукцыйнага металадэтэктара на кармазбіральным камбайне «Палессе-800», а таксама перспектыўныя напрамкі ўдасканалення прылады.

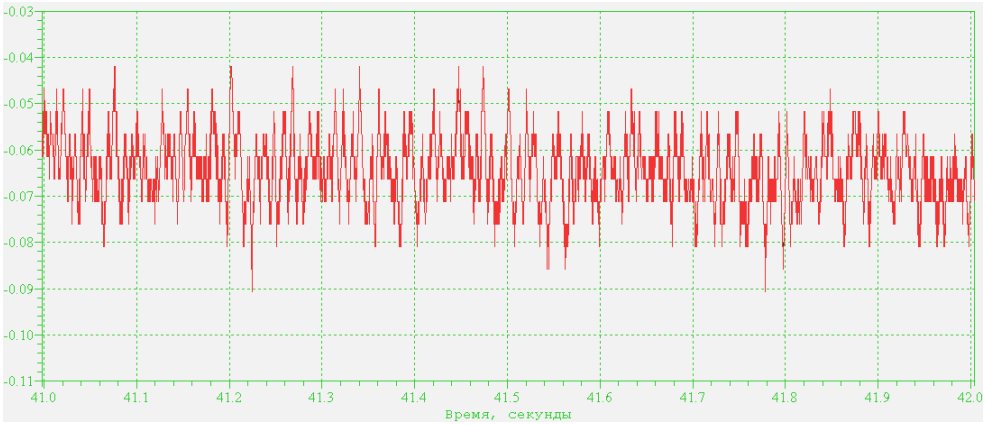
Ключавыя словы: металадэтэктар, кармазбіральны камбайн, натурныя выпрабаванні, перашкодаўстойлівасць, эпаксідны кампаунд, лічбавая апрацоўка сігналаў, эканамічны эфект.

Любая новаразробленая вымяральная прылада, прызначаная для ўсталёўкі на мабільную сельскагаспадарчую тэхніку, мае патрэбу ў праверцы працаздольнасці ў рэальных умовах эксплуатацыі. Кармазбіральны камбайн з’яўляецца крыніцай значных электрамагнітных і вібрацыйных перашкод: работа электрарухавікоў, сістэмы запальвання, а таксама вярчэнне фарміруючых вальцоў ствараюць наводкі, здольныя выклікаць ілжывае спрацоўванне металадэтэктара або, наадварот, знізіць яго адчувальнасць да рэальнага аб'екта. Таму натурныя выпрабаванні макетнага ўзору з’яўляюцца неабходным этапам распрацоўкі, які пацвярджае правільнасць прынятых схематэхнічных рашэнняў [1–3].

Выпрабаванням падвяргаўся макетны ўзор індукцыйнага датчыка рамачнага тыпу з павышанай вібраўстойлівасцю: катушкі ўзбуджальнай і сігнальных абмотак разам з магнітаправодам залітыя эпаксідным кампаундам, што выключае іх узаемнае зрушэнне пры вібрацыі. Апрацоўваючая схема выканана па функцыянальнай схеме, якая ўключае генератар сінусоідных калыханняў, узмацняльнік магутнасці, блок кампенсацыі, абіральны ўзмацняльнік, фазаадчувальны выпрамнік і фільтр ніжніх частот. Выпрабаванні праводзіліся на кармазбіральным камбайне «Палессе-800» на доследна-палявой базе выпрабавальнага цэнтра НТЦК ААТ «Гомсельмаш».

Мэта выпрабаванняў – праверка адчувальнасці металадэтэктара і ацэнка ўзроўню перашкод пры рабоце вальцоў пры іх вярчэнні. Методыка выпрабаванняў уключала наступныя этапы: датчык усталёўваўся ў прыёмным акне камбайна; абмотка ўзбуджэння засілкоўвалася ад генератара частатой 10 кГц токам 500 мА; выходны сігнал апрацоўваючай схемы кантраляваўся асцылографам і дакументаваўся электронным самапісцам. Запіс сігналу праводзіўся ў чатырох рэжымах: пры выключаным рухавіку (тэст на адчувальнасць), пры працуючым рухавіку без вярчэння вальцоў, пры вярчэнні вальцоў на мінімальных і на максімальных абаротах.

Запіс выходнага сігнала металадэтэктара пры працуючым рухавіку камбайна паказан на мал. 1.



Мал. 1. Запіс выходнага сігнала металадэтэктара пры працуючым рухавіку камбайна

Вынікі выпрабаванняў, прыведзеныя ў табліцы, паказалі значнае зніжэнне ўзроўню перашкод у параўнанні з папярэднім макетным узорам металадэтэктара, пабудаваным на аснове элементаў Холла.

Вынікі выпрабаванняў макетнага ўзору індукцыйнага металадэтэктара

Рэжым работы	**Узровень перашкод**		**Зніжэнне перашкод, разоў**
	Стары ўзор МД, В	**Новы ўзор МД, В**	
Пры рабоце рухавіка	± 0,20	± 0,004	50
Вальцы, мін. абароты	± 1,20	± 0,04	30
Вальцы, макс. абароты	± 1,60	± 0,06	26

Як бачна з прыведзеных даных, прымяненне дыферэнцыяльнага ўключэння сігнальных абмотак, абіральнага ўзмацнення і сінхроннага (фазаадчувальнага) дэтэктавання дазволіла знізіць узровень перашкод ад электраабсталявання і вярчаючыхся вальцоў камбайна ў 26–50 разоў. Гэта пацвярджае, што адчувальнасць распрацаванай прылады, у адрозненне ад аналагаў на пастаянных магнітах, практычна не залежыць ад хуткасці руху кармавой масы і не патрабуе ручной падладкі парога спрацавання пад рэжым работы камбайна.

Па выніках выпрабаванняў вызначаны перспектыўныя напрамкі далейшага ўдасканалення прылады. Прымяненне лічбавай апрацоўкі сігналаў на базе мікракантролера або лічбавага сігнальнага працэсара (ЛСП) дазволіць рэалізаваць адаптыўныя алгарытмы фільтрацыі і аўтаматычную наладку парога спрацоўвання. Распрацоўка шматканальнай сістэмы з месцаваннем некалькіх датчыкаў па шырыні захопу камбайна дасць магчымасць не толькі выяўляць метал, але і вызначаць яго становішча ў патоку кармавой масы. Інтэграцыя прылады з CAN-шынай камбайна забяспечыць аўтаматычную змену рэжыму работы (рэверс, спыненне падачы) без удзелу аператара. Важным вынікам работы з'яўляецца і тое, што адмова ад дарагакаштоўных немагнітных матэрыялаў і складаных зварачных тэхналогій робіць прапанаваную прыладу эканамічна абгрунтаванай і больш тэхналагічнай у вытворчасці ў параўнанні з існуючымі аналагамі.

Асобнай увагі заслугоўвае эканамічны складнік распрацоўкі. Замена дарагакаштоўнай немагнітнай нержавеючай сталі і дарагакаштоўных зварачных тэхналогій (якія не парушаюць немагнітнасці матэрыялу) на тыпавыя канструкцыйныя матэрыялы рамкі датчыка, а таксама прымяненне даступнай элементнай базы апрацоўваючай схемы (аперацыйныя ўзмацняльнікі агульнага прымянення, інтэгральны ўзмацняльнік магутнасці TDA2030, камутатар К590КН4), дазваляюць істотна знізіць сабекошт вырабу металадэтэктара ў параўнанні з існуючымі аналагамі. З улікам таго, што прадпрыемствы, якія выпускаюць кармазбіральную тэхніку (у прыватнасці, ААТ «Гомсельмаш»), зацікаўлены ў зніжэнні кошту камплектуючых без страты надзейнасці абароны рэжучага апарата, эканамічная абгрунтаванасць прапанаванага тэхнічнага рашэння істотна павышае перспектывы яго ўкаранення ў серыйную вытворчасць.

Такім чынам, натурныя выпрабаванні пацвердзілі працаздольнасць і высокую перашкодаўстойлівасць распрацаванага індукцыйнага металадэтэктара, а прапанаваныя напрамкі мадэрнізацыі задаюць перспектыву для далейшага павышэння яго эксплуатацыйных характарыстык.

Літаратура

1. Патент BY 7438, МПК G 01R 33/02, A 01D 75/00 (2006.01). Металлодетектор для кормоуборочной техники : № u 20101086 : заявлено 31.12.10 : опубл. 30.06.11 / Карпов В. А., Соболев Д. В., Ростокина О. М. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – URL: https://elib.gsty.by/handle/220612/231 (дата обращения: 10.07.2026).
2. Соболев, Д. В. Металлодетектор для защиты рабочих органов кормоуборочной техники / Д. В. Соболев ; науч. рук. В. А. Карпов // Творчество юных – 2012 : сб. науч. ст. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2012. – С. 163–166.
3. Соболев, Д. В. Металлодетектор на основе элементов Холла / Д. В. Соболев ; науч. рук. В. А. Карпов // Творчество юных – 2013 : сб. науч. ст. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2013. – С. 180–183.
4. Карпов, В. А. Преобразовательная техника : метод. указания к курсовому проектированию по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / В. А. Карпов, О. М. Ростокина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 43 с.

Научное издание

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ЭНЕРГЕТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

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

Гомель, 23–24 апреля 2026 года

В двух частях
Часть 1

Ответственные за выпуск: *Н. Г. Мансурова*, *Т. Н. Мисюрова*

В авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 13.10.26.
Формат 60x84/$_8$. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 40,45. Уч.-изд. л. 32,73.
Тираж 30 экз. Заказ № 514/30.

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