ISSN 2410-5031

Научно-практический журнал

АГРОТЕХНИКА И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ

ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.В. ПАРАХИНА

№ 4 (49), 2025 г.

ОРЕЛ 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – **А.В. Виноградов,** доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры "Электроснабжение" Орловского ГАУ,
профессор кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика" РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:
Буяров Виктор Сергеевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.
Большев Вадим Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".
Букреев Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".
Виноградова Алина Васильевна, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".
Шарупич Вадим Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, академик МАЭН, директор НИПИ «Градоагроэкопром».
Ковалев Михаил Михайлович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный центр лубяных культур (ФГБНУ ФНЦ ЛК).
Коломейченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ; заведующий отделом Управления перспективных технологий Центра сельскохозяйственного машиностроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».
Кузнецов Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.
Лавров Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева.
Олин Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и эксплуатация электрооборудования» ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия».
Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
Черкасова Нина Ильинична, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Рубцовского индустриального института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.
Шпиганович Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», член-корреспондент Российской Академии Естествознания.

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ **А.К. Букреева**
ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ – кандидат технических наук, доцент **Р.П. Беликов**

Зарегистрировано в федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), номер свидетельства ПИ № ФС 77-78888, дата регистрации 28.08.2020.
Договор с РИНЦ №410-07/2014 от 15.07.2014г. **ISSN 2410-5031**

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
Адрес издателя: 302019, Россия, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69, тел.: +7(4862) 76-14-51; факс: +7(4862) 76-06-64.
Адрес редакции: 302019, Орловская обл., г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, институт инженерных систем и технологий, ауд. 2-211.
Тел.: 8(4862) 76-11-07

Адрес типографии: 302028, г. Орел, бульвар Победы, 19. ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.
Тел.: 8(4862) 43-25-53 **E-mail: winaleksandr@yandex.ru**
Дата выхода журнала: 24.12.2025г.
© ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2025 **Тираж 100 экз.** Распространяется бесплатно 16+

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В РАЗВИТИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ПУСТЫННОЙ ЗОНЕ КАРАКУМЫ 9

Пенджиев Ахмет Мырадович

Туркменский государственный архитектурно - строительный институт

СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРОПРИВОДА 16

Мищенко Е.В., Иванин И.Е.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ 21

Шпиндлер Л. С., Четвериков Е. А.

ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА 2005-2015 ГОДЫ 28

Шалимов В.О.

Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Россия, Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРА ПИРОЛИЗНОЙ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ 37

Г.Н. Узаков, С.Г. Маматкулова

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

РАЗРАБОТКА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СВОБОДНОПОТОЧНЫХ ВОДОТОКОВ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ И ПЛАВУЧЕГО ОСНОВАНИЯ 48

Г.Н.Узаков[1], Р.А. Мамедов[2]

[1]Каршинский государственный технический университет

[2] Бухарский государственный технический университет

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ 60

Н.А. Стушкина, Е.А. Татаринцева, А.В. Браганец

ФГБОУ ВО Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ ТЯГИ ОТ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА 73
И.З. Сулейманов, Д.Ф. Балтиков
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

УСТРОЙСТВО МОНИТОРИНГА ЗАГРУЗКИ МАЛОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ 79
Попрядухин Е.В., Крамской С.В., Панфилов А.А., Виноградов А.В.
Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина,
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

АНАЛИЗ РЫНКА ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ В РОССИИ 88
Попрядухин Е.В.
Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И КОРО-ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ АПК 94
Е.Б. Жуков, А.В. Капишников
АлтГТУ им. И.И. Ползунова

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ РЕСУРСНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЮГО-ВОСТОЧНЫХ КАРАКУМАХ
Ахмет Пенджиев[1], Непес Астанов[2] 101
[1] Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
[2] Туркменский государственный педагогический институт им. С.Сейди

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ 112
А.А. Бородин, И.В. Алтухов
ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

БЕСПРОВОДНАЯ ЗАРЯДКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ 116
А.А. Ишмакова, Д.Ф. Балтиков
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОБЩУЮ СЕТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ 123
В.В. Кравец, Э.А. Бекиров
КФУ имени В.И.Вернадского

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ ВОДОРОДНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГИБРИДНОГО КОМПЛЕКСА ФЭУ–ВЭУ–H_2 ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ АПК 130
Мерием Слиманоу
Тамбовский государственный технический университет, г.Тамбов, Россия

СУТОЧНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО КОМПЛЕКСА С ВОДОРОДНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ОРОШЕНИЯ 138
Мерием Слиманоу, Калинин Вячеслав Федорович
Тамбовский государственный технический университет, г.Тамбов, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ И МЕСТА ПОДКЛЮЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ 145
А.В. Богдан[1], А.В. Богдан (мл)[1], К.А. Гарькавый[2]
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ[1], ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева[2]

ОЗОНИРОВАННАЯ ВОДА В СОВРЕМЕННОМ ПТИЦЕВОДСТВЕ 152
В. Л. Болотин, А. В. Пискарёва
РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И КЛАССИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ 158
Владыкин И. Р.[1], Владыкин Д. И.[2]
[1]Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск, Удмуртская республика, Российская Федерация
[2]Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Удмуртская республика, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ТРАВМАТИЗМА ВЫМЕНИ 164
А.А. Жидович
Белорусский государственный аграрный технический университет

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

ПРЕДПОСЫЛКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРЕД НАЧАЛОМ УБОРОЧНЫХ РАБОТ 173
Шеварыкина Д.В., Полохин А.М.
ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ В «ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ» 177
Ковалев В.А.
Белорусский государственный аграрный технический университет

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ 3D-ПЕЧАТНЫХ КАПСУЛ ДЛЯ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА 183
Мищенко Е.В., Асонов, Д.Г.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина" (г. Орел)

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОЙ ОЦЕНКИ МАССЫ КОРОВ С ИСПОЛЬЗОВЫАНИЕМ ИНС 194
Немирович С. И. Гируцкий И.И.
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ УХОДА ЗА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ РАСТЕНИЯМИ 200
В.В. Васильев[1], Д.Н. Афоничев[1], И.И. Аксенов[1]
[1]ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СЕМЯН ЛЬНА-ДОЛГУНЦА В СЕМЯПРОВОДЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ 207
Фирсов А.С., Клюева К.Ю.
ФГБОУ ВО «Тверская ГСХА»

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА «ВИБРОМЕТР» ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ 213
Р.А. Булавинцев, А.С. Комоликов, А.В. Волженцев, А.М. Полохин, И.Е. Пупавцев
ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВОГО ОПЫТА ЦТЗ КАК ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ 220
Беленков А.И.
ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, г. Лобня

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМОЙ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ 226
А.И. Азнагуловов, А.В. Линенко, В.В. Лукьянов
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЯЛЬНО-ТРЕПАЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ КОНОПЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ 232
А.Н. Жалнин, С.И. Головин, А.Л. Севостьянов, Р.А. Булавинцев, А.М. Полохин, А.С. Комоликов
ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА ХОДОВОГО ВИНТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА В ТЕПЛИЦЕ 237
В.В. Васильев
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ВЕТЕРИНАРНОГО КОНТРОЛЯ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МОЛОКА 244
Д.Д. Слимаков, И.И. Гируцкий
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ МАЙОНЕЗНОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ 250
В.В. Демичев, В.Н. Андреев, С.А. Бредихин
ФГБОУ-ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЕСОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ЕДИНИЦ АФРИКАНСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ НЕЙРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЛАНЕТАРНОЙ ПОДЗЕМНО-ПОДВОДНОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ НЕЙРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ ВЫСШЕЙ КАТЕГОРИИ НАДЕЖНОСТИ С ЧЕТЫРЬМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ДОЛГОСРОЧНУЮ ПЕРСПЕКТИВУ ДО 2530 ГОДА. КЛЮЧ К АФРИКЕ 256
Шарупич В.П., Гиамфи Ассале Эме Сезер
ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина»,
Шарупич П.В.,
ООО «Патент»
Шарупич С.В.,
НИПИ «Градоагроэкопром» ООО «Патент»
Шарупич Т.С.,
«Градоагроэкопром»
Шарупич С.С., НИПИ «Градоагроэкопром» ООО «Патент»

Памяти Нины Васильевны Калашниковой,
кандидата технических наук, профессора посвящается…



1975 год, весенний месяц март, для Орловского аграрного университета стали особым историческим и научно-профессиональным событием – открытие Орловского сельскохозяйственного института и осуществление первого набора – приема студентов на очную форму обучения по специальностям «Агрономия» и «Зоотехния».

3 декабря 2025 года коллектив преподавателей, сотрудников, студентов Орловского аграрного университета простился с замечательным и удивительно трудоспособным человеком, кандидатом технических наук, профессором Ниной Васильевной Калашниковой, 01 мая 1938 года рождения, д. Вырубовка, Сердобского района, Пензенской области. По окончанию учебы в Саратовском институте механизации сельского хозяйства имени М.И. Калинина она была направлена на работу в отдел механизации Всероссийского научно-исследовательского института зернобобовых и крупяных культур Орловской области, г. Орла, который стал началом ее научной деятельности в должности младшего научного сотрудника. Результатом научно-профессиональной деятельности Нины Васильевны Калашниковой и ее учебы в аспирантуре Всесоюзного института механизации (ВИМ) явилась успешная защита диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Как молодой, перспективный ученый она была приглашена и принята на работу в Орловский сельскохозяйственный институт в должности старшего преподавателя кафедры механизации, электрификации сельского хозяйства и инженерной графики, который в 1975 году проводил свой первый набор студентов.

Работая в Орловском сельскохозяйственном институте она прошла путь от старшего преподавателя до заведующей кафедрой сельскохозяйственных машин Орловского государственного университета. За период 1975-2007 г.г. и с сентября месяца 2007 года Нина Васильевна работала в должности профессора кафедры механизации технологических процессов в АПК Федерального государственного образовательного учреждения Высшего профессионального обучения «Орловский государственный аграрный университет». Общий стаж ее трудовой деятельности более полувека, за который Нина Васильевна внесла весомый свой вклад в развитие Орловского государственного аграрного университета, становление факультета механизации сельского хозяйства и развитие кафедры «Механизация технологических процессов в АПК» Орловского ГАУ не только как профессор, но и как изобретатель, имеющая патенты на изобретения, используемые в сельскохозяйственном -производстве: «Динамометр», «Зерносушилка псевдоожиженного слоя», «Двухдисковый сошник», «Пневматический высевающий аппарат».

Калашникова Нина Васильевна на протяжении 13 лет являлась деканом факультета механизации сельского хозяйства Орловского аграрного университета, активно создавая кадровый потенциал факультета и области, укрепляя их материальную базу. Под ее научным руководством были подготовлены четыре кандидата технических наук, более 100 учебно-методических и научных публикаций, в том числе 11 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Нина Васильевна, добрая, отзывчивая, глубоко порядочная и интеллигентная, успешно сочетала в себе тактичность, твердость и принципиальность. **Человек** с большой буквы.

Руководство, профессорско-преподавательский коллектив университета, студенты и сотрудники выражают искренние соболезнования родным и близким профессора Калашниковой Нины Васильевны и всем, кто имел честь учиться у нее и работать с ней.

Д.с/х. н., профессор Степанова Л.П.

УДК 621. 383 + 631.3

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В РАЗВИТИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ПУСТЫННОЙ ЗОНЕ КАРАКУМЫ

Пенджиев Ахмет Мырадович

Туркменский государственный архитектурно - строительный институт

Аннотация. *В статье рассмотрены научно обоснованы, систематизированы солнечные ресурсы и оценены энергетические потенциалы Туркменистана. Разработанная, составленная геоинформационные технологические карты на основе солнечных ресурсных энергопотенциалов позволят создать и внедрить солнечные фотоэлектрические водоподъемные установки в пустыни Каракумы. Полученные результаты подтверждены экспериментально при этом в год составляет: экономия органического топлива - 12,0 т; экологичность сокращения выбросы CO_2 - 38,4 т; прибыль от внедрения одной станции равна 3830 долл. США. Полученные технические, экономические и экологические потенциалы от использования энергетических установок на их основе разработанной солнечной геоинформационной технологической карта даст возможность размещения солнечных водоподъемных установок и создание солнечных тепличных хозяйств в пастбищах пустыни Каракум, что повысить энергоэффективность, экологиченость и продовольственную безопасность.*

Ключевые слова: *геоинформационные системы, карты, солнечная энергия, установки, технологии, энергообеспечение, энергоэффективность, пустыня Каракумы, Туркменистан.*

Введение. Туркменистан активно реализует политику позитивного нейтралитета в системе международных отношений и поддерживает решение мировых энергетических, экономических и экологических проблем.

Сегодня Туркменистан проводит всеобъемлющие реформы и преобразования, способные обеспечить устойчивый рост на долгие годы вперед. Президента Туркменистана Сердара Бердымухамедова выдвигаются новые задачи по устойчивому развитию экономики страны, которые основаны внедрения инновационных энергетических технологии в различные отрасли производства [1,2].

Основной задачей национальной энергетической программы Туркменистана, является решения ряда взаимосвязанных задач, включающих в себя: обеспечение энергетической безопасности и взаимодействия топливно-энергетического сектора с экономикой страны в интересах населения; повышение энергоэффективности за счет оптимизации мощностей энергогенерирующих структур, внедрение инновационных энергосберегающие технологий; экономическая оценка, содействие развитию сырьевой энергетической базы страны; поддержка научно-технического и организационного потенциала топливно-энергетического комплекса; увеличение экономической эффективности инновационных преобразований в сферах производства передачи энергии и использования формирование механизмов государственного регулирования, функционирования энергетического сектора [1-4].

В решении этих задач отводится использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и принят закон Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии» [1-3,5].

Территорию Туркменистана на 80% занимает пустыня Каракумы, и значительное количество людей проживают в зоне децентрализованного энергоснабжения, поэтому развитие технологии и использование возобновляемых энергетических ресурсов является актуальной проблемой. Ресурсы ВИЭ по объему могут покрыть значительную часть потребления топливно-энергетических ресурсов и решить актуальные энергетические, экономические, экологические и социальные проблемы в Туркменистане [1,3-6].

Туркменскими учеными проделана большая научно-исследовательская и экспериментальная и практическая работа по использованию солнечной энергии и достигнуты значительные научные результаты. Вместе с тем, имеется недостаток основ научного обобщающего, систематизированного анализа энергетических потенциалов. Не достаточно выявлены регионы Туркменистана, обладающие значительными ресурсами энергопотенциалами для внедрения использования энергоэффективых инновационных технологий на основе солнечной энергии, не сформулированы рекомендаций по реализации разработок, развитию и освоению энергетических потенциалов с учетом инновационных методик. Не составлялись геоинформационные технологические карты и номограммы для составления технико-экономического обоснования (ТЭО) [6,8].

Географическая информационная система (ГИС) - новое направление, которая используется как инструмент технологических решений, позволяющий искать дополнительную информацию, анализировать в данном случае цифровую технологическую карту местности с учетом научных и инженерных знаний, технических, энергетических, экономических, экологических потенциалов для использования ВИЭ [5-7].

Полученные результаты научных исследовании восполнят этот пробел и будут способствовать масштабного развития возобновляемой энергетики, сбережению энергоресурсов, улучшению социально-экономических и бытовых условий пастбищных хозяйств, уменьшению антропогенной нагрузки на окружающую среду и изменение климата. На основе литературного обзора, научных исследований по использованию ВИЭ в Туркменистане определены цели и задачи научно-исследовательской работы.

***Цель работы**:* Научно обосновать, систематизировать, рассчитать и исследовать солнечные энергетические потенциалы для разработки, создания, внедрения и использования энергетических технологий на основе солнечной энергии для устойчивого развития Туркменистана.

Материалы и методы исследования. *Геоинформационные технологии в развитий солнечной энергетики* развитие солнечной энергетики (СЭ) в настоящее время требует решения не только технологических задач, принятия законодательных актов, обеспечения государственной финансовой поддержки проектов, но и обоснования вопросов, связанных с анализом энергетических ресурсных потенциалов СЭ.

Накоплены обширные географические массивы данных, обеспечивающие фактическую основу для использования солнечных энергетических технологий в различных хозяйствах. При этом помимо проблемы верификации этих данных, анализа адекватности методов их получения, существуют сложности их визуального наглядного отображения в удобной для анализа форме. Важной задачей является их аккумулирование в виде баз данных, а также картографирование потенциала солнечной энергии для использования в различных регионов страны.

Помимо научного и методического значения, такие исследования имеют большую

практическую востребованность, поскольку базы данных геоинформационных систем (ГИС) должны стать важным инструментом анализа энергоэффективности практического использования солнечной энергии в различных регионах Туркменистана, в частности пустыни Каракумы и составления технико-экономического обоснования при подготовке проектно-сметных документации и управленческих решений использования с учетом технологических и экономических показателей [6-8].

Научные исследования разработки создания ГИС технологической карты. В ходе научных теоретических и экспериментальных исследований изучены солнечные энергетических технологий и установки. Научно обоснованы и теоретически систематизированы основы использования солнечных энергетических потенциалов на территории Туркменистана. Разработана, составлена геоинформационная солнечная энергетическая карта смотрите рисунок 1.

На основе ГИС карты исследованы энергетические характеристики солнечной теплицы, фотоэлектрических модулей при неравномерном освещении, солнечных установок с осесимметричными концентраторами, разработана геоинформационная технологическая карта для размещения солнечных водоподъемных установок в пустыне Каракумы.

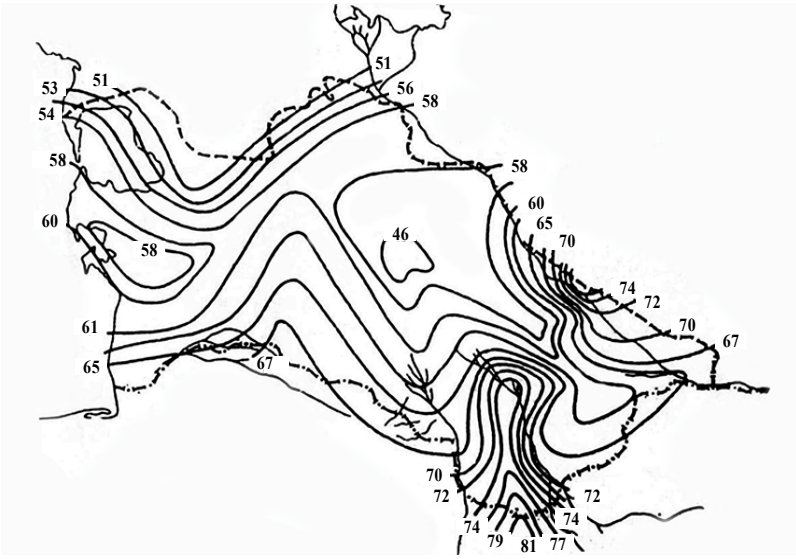


Рисунок 1- Геоинформационая карта солнечно-энергетического баланса на территории Туркменистана (Вт·ч/см^{2}год)

Теоретические, экспериментальные расчетные результаты систематизированы по формализованной методике, определены ресурсные потенциалы и объем снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду от использования солнечных энергетических установок при преобразованную в тепловую и электрическую энергию. При расчетах учтены природно-климатические условия: астрономическая продолжительность солнечного сияния в течение месяца; среднегодовое и месячное значение рабочей температуры солнечной установки и окружающей среды; доли рассеянного излучения, альбедо поверхности, угловых параметров прихода солнечной энергии на наклонную и нормально ориентированную поверхности в течение месяца; часового угла движения солнечного склонения и наклона поверхности к горизонту; удельных энергетических параметров солнечной установки. До настоящего времени такие расчеты с оценкой технических, экономических, потенциалов и экологических показателей в Туркменистане не проводились [5].

Расчитаны распределение валового и технического потенциалов солнечной энергии при преобразовании в тепловую энергию и электрическую в Центральных Каракумах по месяцам (кВт·ч/м^{2}в мес.) гистограмма приведена на рисунке 2.

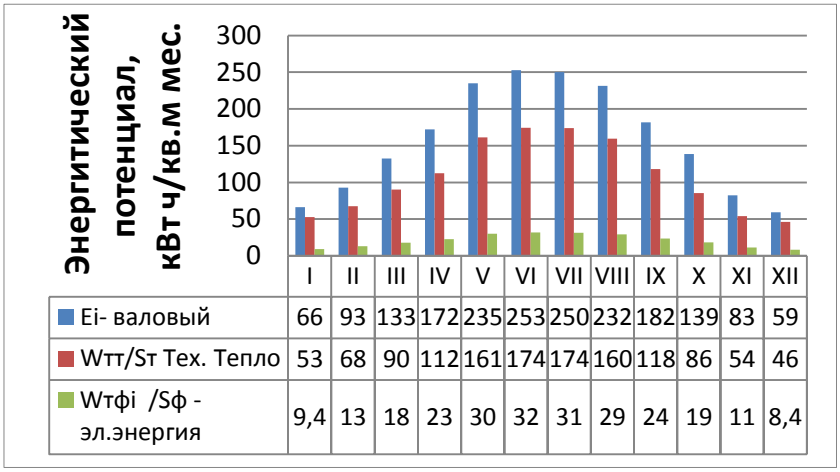


Рисунок 2 - Распределение валового и технического потенциалов солнечной энергии от преобразования в тепловую энергию и электрическую в Центральных Каракумах по месяцам на 1 метр квадратный

Разработка, создание и исследование энергетических характеристик гелиотеплицы для выращивания тропических и субтропических культур. Среди известных работ нет ни одной разработки, которую можно было бы непосредственно использовать для расчета теплотехнических характеристик гелиотеплиц траншейного типа. Рассмотрены физические характеристики, составлена математическая модель теплотехнических характеристик в классической форме для создания микроклимата в гелиотеплице.

Расчет теплового баланса гелиотеплицы траншейного типа представлен как система уравнений теплового баланса для солнечного сооружения воздушного пространства, для промежутка времени dτ с учетом дополнительного обогрева в кВт·ч, которую можно записать в виде:

$$dQ_{об} + dQ^{\Sigma}{}_{р} + dQ_{в} + dQ_{т} + dQ_{ст} + dQ_{п} + dQ_{а} + dQ_{р} = 0, \quad (1)$$

где $dQ_{об}$ - тепловыделение системы отопления; $dQ^{\Sigma}{}_{р}$- поток тепла солнечной радиации, поступающей в солнечное сооружение; $dQ_{в.т}$ - количество тепла, отдаваемое окружающей среде в результате воздухообмена и теплопередачи через ограждения; $dQ_{ст} = dQ^{*}{}_{ст} + dQ^{o}{}_{ст}$ - поток тепла в стенку; $dQ_{п} = dQ_{п}^{*} + dQ_{п}^{o}$ - поток тепла в почву, $dQ^{*}{}_{п\,(ст)}$, $dQ_{п\,(ст)}^{o}$ - поток тепла на освещенную и неосвещенную части стенки и почвы; $dQ_{а}$- поток тепла, аккумулируемый в воздухе; $dQ_{р}$ - поток тепла на растительный покров (при условии, если теплица с растениями). Единицы измерения кВт·ч на площадь. Уравнение теплового баланса поверхности почвы, стенки записывается аналогичным образом, как уравнение теплового баланса для почвы, стены освещенной и неосвещенной ее части.

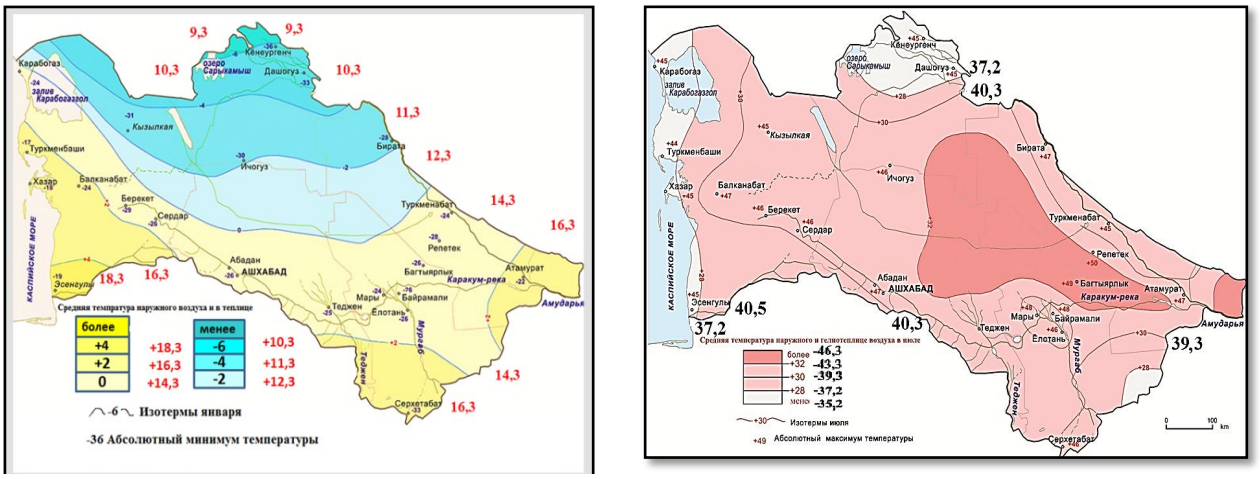
В результате математических преобразований уравнения (1), температурный режим гелиотеплицы во временном суммарном тепловом потоке имеет вид [6]:

$$\theta_{в} = \int_{o}^{\tau} I\,(\delta)\exp[-h(\tau-\delta)]d\delta - \sum_{i=1}^{4}\frac{Bi\,(\tau)}{R_i}, \quad (2)$$

Проведены исследования сложной и упрощенной математической модели теплотехнических параметров траншейной гелиотеплицы. Полученные результаты расчета показали, что сложная и упрощенная математическая модель адекватно воспроизводят результаты эксперимента, с точностью: сложная модель – 12,35%; упрощенная – 23,11%.

Аналогично составлена и рассмотрена математическая модель тепломассобмена и определения температуры листовой поверхности растения в гелиотеплице**.** Физическая модель теплотехнических процессов, происходящих в гелиотеплице траншейного типа, принимаемая при расчетах, подробно показана в монографии.

Составленная геоинформационная карта средней изотермы наружного воздуха и гелиотеплицы траншейного типа в январе месяце (отмечены красным цветом), аналогично составлена карта для июля месяца приведена на рисунке 3 а,б. Результаты внедрения и ввода в действие подтверждены актами, протоколами исследования, справками.



а) б)

Рисунок 3 а,б. - Карта средней изотермы наружного воздуха и гелиотеплицы траншейного типа в январе (а) и июле (б) месяце по регионам Туркменистана

Результаты и анализ исследования. На основе научно обоснованных систематизированных энергетических ресурсов, потенциалов и внедренных энергетических технологий на основе ВИЭ для Туркменистана получены следующие результаты:

Солнечная энергопотенциалы: *Валовые ресурсы* в кВт·ч/(м^2·год) в регионах равны: Северном - 1757,4; Юго-восточном - 1895,9; Центральных Каракумах -1844,6; Южном - 1725,0; Западном -1685,4.

Технические потенциалы преобразования в тепловую энергию и электрическую энергию в кВт·ч/(м^2·год) в соответственно по регионам: Северном - 1227,587 и 244.84; Юго-восточном - 1296,78 и 248.55; Центральных Каракумах - 1256,44 и 242.44; Южном - 1234,46 и 225.29; Западном -1177,12 и 222,6.

Экономические потенциалы от преобразования в тепловую и электрическую энергию составляют в кг у.т./год: Северной - 490,9 и 97,9; Юго-восточной- 518,7 и 99,44; Центральных Каракумах - 502,6 и 96,98; Южной - 493,8 и 90,14; Западной - 470,9 и 89,1.

Экологические потенциалы: сокращение выбросов различных вредных веществ в окружающую среду при использовании солнечной фотоэлектрической станции составит в Центральных Каракумах при годовой выработке электроэнергии с 1 м^2 - 242,44 кВт·ч/год, экономии расхода топлива - 96,98 кг у.т./год, сокращение выбросов составит, кг/год: диоксида серы SO_2 – 2,01; оксида азота NOx– 1,08; оксида углерода CO- 0,1401; метана CH_4 – 0,296; двуокиси углерода CO_2 – 155,08; твердых веществ – 0,211175; при преобразовании в тепловую энергию с 1 м^2 – годовом производстве 1256,44 кВт·ч/год, экономия расхода топлива - 502,60 кг у.т./год, сокращение выбросов составит, кг/год: SO_2 – 10,44; NOx–5,624;

CO – 0,726; CH_4 – 1,53; CO_2 – 803,68; твердых веществ – 1,094.

Заключение. На основе анализа природно-климатических особенностей Туркменистана, водных ресурсов, подземных вод и дебита колодцев пустыни составлена геоинформационая технологическая карта размещения солнечной фотоэлектрической водоподъемной установки по мощности вырабатываемой энергии в зависимости от глубины колодцев на пастбищных территориях Туркменистана. Использование картографического материала позволила подсчитать энергетические ресурсы, сократить выбросы парникового газа и снизит расходы органического топлива для развития 40 млн. га пастбищных районов страны.

Созданная и введенная в действие солнечная фотоэлектрическая водоподъемная установка (СФВУ) в Центральных Каракумах на экспериментальной базе Национального института пустынь, растительного и животного мира в год экономит 12,0 т органического топлива, приносит прибыль 3830 долл. США при этом сокращает выбросы CO_2 на 38,4 т.

Учитывая приоритеты и перспективы использования энергетических технологии на основе ВИЭ в Туркменистане по механизму чистого развития (МЧР) и возможности сокращения выбросов парниковых газов в ТЭК, определены области развития солнечной энергетики и показатели ее энергоэффективности. При создании завода в Туркменистане по производству СФЭУ с годовой мощностью 20 МВт и годовым выпуском продукции, равным 14 млн. долл. США, ожидаемый экономический эффект от внедрения продукции завода составит 12 млн. долл. США в год, экономия органического топлива – 3554,4 т у.т. в год. При годовом поступлении солнечной радиации не менее 1200 кВт ч/м^2 и эффективном использовании этой энергии можно будет обеспечить до 25% теплопотребления в системах отопления, до 50% - в системах горячего водоснабжения и до 75% в системах кондиционирования воздуха, сократить расход органического топлива и обеспечить экономию топливно-энергетических ресурсов 2364 тыс. т у.т. или 52.6%, в том числе в сельской местности 1110.6 тыс. т у. т. или 61.5% .

Список использованных источников:

1. Бердымухамедов Г.М. Туркменистан на пути достижения Целей устойчивого развития / Г.М. Бердымухамедов –-Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2018. - 468 с.
2. Бердымухамедов Г.М.Электроэнергетическая мощь Туркменистана. –Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2022.– 130 с.
3. Бабаев, А.Г. Проблемы освоения пустынь и опустынивания / А.Г. Бабаев. – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2012. – 408 с.
4. Пенджиев А.М. Экологические проблемы освоения пустынь. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. - 226 с.
5. Пенджиев А.М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии: монография. – Москва: Русайнс, 2023. 400 с.
6. Пенджиев А.М. Основы ГИС в развитии возобновляемой энергетики: монография / А.М. Пенджиев– Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. - 308 с.
7. Рафикова Ю.Ю. Геоинформационное картографирование ресурсов возобновляемых источников энергии (На примере юга России): автореф. дис. … канд. геогрф. наук: 25.00.33 / Рафикова Юлия Юревна. – М.: 2015. – 22 с.
8. Стребков Д.С., Пенджиев А.М., Мамедсахатов Б.Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. - Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2012.- 498 с.

Пенджиев Ахмет Мырадович, доктор технических наук, доктор сельскохозяйственных наук, доцент кафедры автоматизация производства Туркменского государственного архитектурно-строительного института.
тел. моб. +793365801754, Туркменистан, Ашхабат, Б. Аннанова 136. E-mail: ampenjiyev@gmail.com

GEOINFORMATION SYSTEMS FOR THE DEVELOPMENT OF SOLAR ENERGY IN THE KARAKUM DESERT ZONE

Akhmet Myradovich Penjiev

Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering

Abstract. This article presents a scientifically substantiated and systematized analysis of solar resources and an assessment of Turkmenistan's energy potential. The developed and compiled geoinformation technology maps based on solar resource energy potential will enable the creation and implementation of solar photovoltaic water-lifting systems in the Karakum Desert. The obtained results have been confirmed experimentally, yielding the following annual savings: fossil fuel savings of 12.0 tons; environmentally friendly reduction of CO2 emissions of 38.4 tons; and the profit from implementing one station of $3,830. The technical, economic, and environmental potential gained from using energy installations based on the developed solar geoinformation technology map will enable the deployment of solar water-lifting installations and the creation of solar greenhouses in the pastures of the Karakum Desert, thereby increasing energy efficiency, environmental friendliness, and food security.

Keywords: geoinformation systems, maps, solar energy, installations, technologies, energy supply, energy efficiency, Karakum Desert, Turkmenistan.

Akhmet Myradovich Pendzhiev, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Industrial Automation Department at the Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering.
Mobile phone: +793365801754, Turkmenistan, Ashgabat, B. Annanov 136. Email: ampenjiyev@gmail.com

УДК 621

СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРОПРИВОДА

Мищенко Е.В., Иванин И.Е.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

Аннотация. *Данная статья представляет собой исследование способов защиты от вибраций, возникающих при работе электромагнитного вибропривода. В работе рассмотрен принцип функционирования электромагнитного вибропривода, основанный на действии переменного магнитного поля и взаимодействии ферромагнитного якоря с электромагнитной системой. Проанализированы механизмы формирования вибраций в подобных устройствах, включая влияние амплитуды и частоты питающего тока, жёсткости упругих элементов, конструктивных особенностей магнитопровода и возникновения резонансных режимов. На основе анализа сформирована классификация методов защиты от вибраций и предложен комплекс инженерных решений, направленных на снижение воздействия вибраций на оборудование, технологические линии и персонал. Предложенные методы позволяют существенно снизить негативное воздействие вибраций, повышая безопасность и экономичность производственных процессов. Результаты исследований обобщены в форме практических рекомендаций, пригодных для внедрения в реальных условиях производства.*

Ключевые слова: *электромагнитный вибропривод, вибрация, защита от вибраций, демпфирование, механические колебания.*

Введение. В современной промышленности вибрационные приводы занимают одно из ключевых мест, благодаря способности создавать возвратно-поступательные движения без применения сложных механических передач. Электромагнитный вибропривод представляет собой устройство, состоящее из Ш-образного двухобмоточного электромагнита 1 (статора), ферромагнитного якоря 2 (ротора) и упругого элемента 3 (пружины) (рисунок 1) [2, 4].

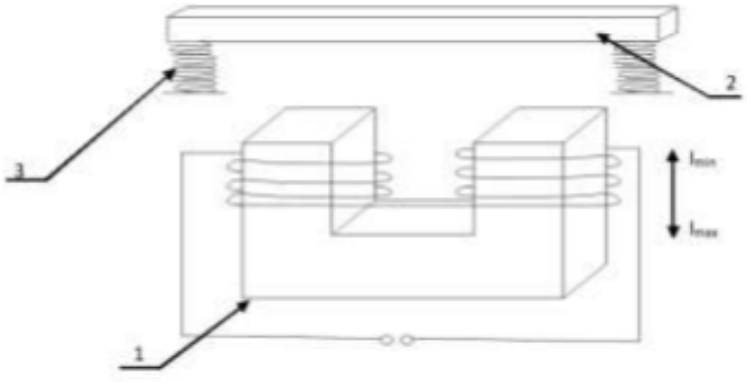


Рисунок 1 – Схема электромагнитного вибропривода

Механизм действия вибропривода строится на циклическом изменении силы электромагнитного поля. При максимальном токе I_{max} якорь притягивается к сердечнику,

сжимая пружину, а при уменьшении тока до I_{min} пружина разжимается и возвращает якорь в исходное положение. Поскольку магнитный поток изменяется дважды за период синусоидального тока, частота колебаний вибропривода оказывается в два раза выше частоты сети. При частоте бытовой сети 50 Гц выходная частота вибраций составляет 100 Гц, что делает такие приводы эффективными источниками высокочастотных механических колебаний [2].

Основная часть. Проведённые исследования на лабораторной установке, представленной на рисунках 2-3, подтверждают, что электромагнитный вибропривод обладает рядом существенных преимуществ. Среди них отсутствие подшипников, вращающихся и трущихся узлов, простота конструкции, удобство получения возвратно-поступательного движения. Вместе с тем исследователи отмечают недостатки – повышение габаритов и энергопотребления при увеличении мощности, значительный уровень шума, сопровождающий работу устройства, а также значительная вибрация [2].



Рисунок 2 – Лабораторная установка с электромагнитным виброприводом (фото авторов)



Рисунок 3 – Электромагнит вибропривода (фото авторов)

Электромагнитный вибропривод по своей природе создаёт интенсивные колебания, которые обеспечивают его работу, но одновременно становятся источником негативных воздействий на окружающие конструкции и элементы оборудования. Передача вибраций на корпус, фундамент или рабочие узлы может приводить к появлению неравномерных нагрузок, ускоренному износу крепёжных соединений, увеличению уровня шума и

снижению эксплуатационной надёжности системы. Особую опасность представляет вероятность возникновения резонансных режимов, когда частоты возбуждения совпадают с собственными частотами элементов конструкции, это приводит к значительному росту амплитуды колебаний и повышает риск повреждений.

Для уменьшения вибрационных воздействий применяется целый набор инженерных решений. Наиболее распространённый подход – использование виброизоляции, то есть устройств, препятствующих распространению колебаний на опорные поверхности. Одним из эффективных вариантов считаются резинометаллические элементы, выполненные из комбинации эластомера и металлических вставок. Эти опоры способны существенно снижать вибрационные нагрузки и применяются как в лабораторных установках, так и в промышленном оборудовании.

В ситуациях, когда масса вибропривода значительна, предпочтение отдают пружинным виброизоляторам. Наличие пружины позволяет системам адаптироваться к различным частотам и уменьшать динамические усилия, возникающие при колебаниях. Для повышения эффективности нередко используется комбинированная схема, включающая пружинный элемент и демпфирующий слой из резины: такая конструкция одновременно снижает вибрации и гасит остаточные колебания [6].

Помимо виброизоляции важную роль играет оптимизация конструкции самого вибропривода. Усиление рамы или корпуса, увеличение жёсткости отдельных узлов, переработка геометрии магнитопровода, а также точная подгонка размеров и уменьшение зазоров способствуют снижению уровня вибраций, возникающих при работе устройства. Использование качественных материалов и устранение слабых мест в конструкции позволяет не только уменьшить вибрационное воздействие, но и повысить ресурс работы оборудования [3].

Для дополнительного уменьшения амплитуды колебаний применяются различные методы демпфирования. Одним из распространённых решений являются вязкостные демпферы, в которых в качестве рабочей среды используется силиконовая жидкость или другие вязкие составы. Благодаря внутреннему сопротивлению жидкости энергия колебаний преобразуется в тепловую, что обеспечивает заметное снижение амплитуды остаточных колебаний. Такие устройства особенно востребованы в оборудовании, функционирующем в условиях переменных нагрузок, когда амплитуда и частота колебаний постоянно меняются [1].

Ещё одним эффективным средством борьбы с вибрациями являются динамические виброгасители. Это специально настроенные массы, которые совершают собственные колебания, направленные в противофазу к основному вибросигналу. За счёт такого взаимодействия удаётся добиться уменьшения общей амплитуды колебаний корпуса и предотвратить возникновение опасного резонанса. Динамические гасители широко применяются в тяжёлых и крупногабаритных вибрационных установках, где стандартные методы виброизоляции оказываются недостаточными [3].

Заметно уменьшить вибрационные нагрузки можно не только механическими средствами, но и за счёт корректировки электрических параметров вибропривода. Управление током в обмотках позволяет регулировать силу электромагнитного воздействия и, соответственно, амплитуду возникающих колебаний. Благодаря применению тиристорных регуляторов, преобразователей частоты и систем плавного пуска можно смягчить переходные процессы при включении, сократить ударные нагрузки и выбрать оптимальный частотно-амплитудный режим [5].

При работе оборудования, содержащего несколько вибропривода, особое внимание уделяется их согласованности. Если вибровозбудители функционируют несинхронно, особенно в противофазе, то их взаимодействие может вызвать появление эффектов биений – периодического усиления и ослабления вибраций. Для исключения подобных явлений используют системы синхронизации, обеспечивающие согласованную работу всех вибрационных модулей и предотвращающие чрезмерное увеличение колебательных нагрузок [5].

Колебания, создаваемые вибропривода, приводят не только к механическим воздействиям, но и к повышенному уровню шума, который негативно влияет на условия труда. Для уменьшения акустического воздействия применяются кожухи с шумопоглощающим наполнителем, защитные экраны и специальные облицовочные материалы. Дополнительную защиту обеспечивают виброизолированные рабочие площадки и покрытия, уменьшающие передачу колебаний на ноги оператора [7].

Заключение. Проведённый анализ причин возникновения вибраций позволил выявить основные факторы, усиливающие вибрационное воздействие: повышение амплитуды питающего тока, конструктивные неточности, изменение жёсткости упругой системы, а также резонансные явления. На основе систематизации инженерных подходов предложен комплекс методов защиты от вибраций, включающий конструктивные, виброизоляционные, демпфирующие, электронные и организационно-технические меры.

Применение описанных методов позволяет значительно снизить влияние вибраций на оборудование и окружающие конструкции, обеспечить стабильность технологических процессов, повысить безопасность работы и увеличить ресурс вибропривода. Комплексный подход к виброзащите является необходимым условием эффективной эксплуатации электромагнитных вибропривода в промышленности и научно-технических системах.

Список использованных источников

1. Липатов, И.А. Виброзащита и вибродемпфирование машин. – М.: Машиностроение, 2018. – 256 с.

2. Мищенко, Е.В., Иванин, И.Е. Принцип работы электромагнитного вибропривода // Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе. Том 2: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Орел: Изд-во Орловский ГАУ, 2024. – С. 313-316.

3. Мищенко, Е.В., Белевский, А.Р. Исследование способов снижения вибрации // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса [Текст]: Материалы научно-технической конференции с международным участием имени А.Ф. Ульянова. – Саратов: ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2023. – С. 142-145.

4. Особенности устройства и работы вибропривода. – Режим доступа: https://studopedia.su/14_58493_osobennosti-ustroystva-i-raboti.html (дата обращения 30.11.2025).

5. Смирнов, А.Н., Копылов, И.П. Электропривод: теория и системы управления. – М.: Энергия, 2020. – 464 с.

6. Яцун С.Ф. Вибрационная техника в пищевой и перерабатывающей промышленности [Текст]: учеб. пособие / Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. ак. 2010. – 144 с.

7. ГОСТ 12.1.012–2004 «Вибрационная безопасность. Общие требования».

Мищенко Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент, art_lena@inbox.ru, Россия, Орел, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина»

Иванин Иван Евгеньевич, бакалавр 3 курса, ivanivanin772@gmail.com, *Россия, Орел, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет им. Н.В.Парахина»*

METHODS OF VIBRATION PROTECTION DURING OPERATION OF AN ELECTROMAGNETIC VIBRATION DRIVE

Mishchenko E.V., Ivanin I.E.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin" (Oryol)

Abstract. This article presents a study of methods for protecting against vibrations generated during the operation of an electromagnetic vibrator. The operation principle of an electromagnetic vibration drive based on the action of an alternating magnetic field and the interaction of a ferromagnetic armature with an electromagnetic system is discussed in this paper. The mechanisms of vibration generation in such devices are analyzed, including the influence of the amplitude and frequency of the supply current, the stiffness of the elastic elements, the design features of the magnetic core, and the occurrence of resonance modes. Based on this analysis, a classification of vibration protection methods is developed, and a set of engineering solutions is proposed to reduce the impact of vibrations on equipment, process lines, and personnel. The proposed methods make it possible to significantly reduce the negative impact of vibrations, increasing the safety and efficiency of production processes. The research results are summarized in the form of practical recommendations suitable for implementation in real production conditions.

Keywords: electromagnetic vibration drive, vibration, vibration protection, damping, and mechanical oscillations.

Elena Mishchenko, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, art_lena@inbox.ru, Russia, Orel, Orel State Agrarian University.

Ivan Ivanin, 3-year Bachelor's degree, ivanivanin772@gmail.com, Russia, Orel, Orel State Agrarian University.

УДК: 004.89

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

Шпиндлер Л. С., Четвериков Е. А.

ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева

Аннотация. *Значительное увеличение вычислительной мощности микропроцессорных устройств позволило интегрировать в существующие производственные процессы системы интеллектуальной обработки и анализа данных, получаемых от средств объективного контроля. В статье проведен анализ таких методов для автоматизированной сортировки плодоовощной продукции с целью определения возможности разработки оборудования и программного обеспечения для цифровой оценки качества. Рассмотрены методы на основе цветных телевизионных датчиков, гиперспектрального анализа, гибридные электрооптические методы и метод флуоресценции хлорофилла. Определены их преимущества и ограничения. В результате предложен алгоритм автоматизированной сортировки, основанный на комплексном использовании систем технического зрения, алгоритмов глубокого обучения и нечеткой логики. Установлено, что такой подход позволит повысить точность определения пригодности плодов для переработки, учитывая как внешние дефекты, так и оценку возможных внутренних повреждений.*

Ключевые слова: система технического зрения (СТЗ), гиперспектральный анализ, нечеткая логика, нейронная сеть, автоматизированная сортировка.

Введение. В настоящее время агропромышленный комплекс страны производит большое количество различных видов плодоовощной продукции, необходимой для процесса переработки. Ключевым фактором здесь является качество исходного сырья. Так, поверхностные повреждения плодов - ушибы, царапины - не оказывают существенного влияния на процесс переработки, в то время даже небольшие участки гнили резко ухудшают вкус и химический состав сока и других консервантов, что напрямую снижает его потребительские свойства и сроки годности [1]. Одной из проблем в процессе послесборочной переработки является проблема ручной сортировки. До сих пор на многих производствах осуществляется ручная сортировка различных плодов, что снижает эффективность отбора здоровых продуктов из-за присутствия человеческого фактора [2]. Рассмотрим возможные методы сортировки с целью выявления рационального с точки зрения автоматизации процесса.

Методы. Всего предоставляется к рассмотрению четыре метода технической оценки качества.

Метод на основе применения цветных телевизионных датчиков. Плоды, вращаясь на конвейере, снимаются камерами с разных ракурсов. Программное обеспечение анализирует цвет каждого пикселя изображения (в RGB), сравнивая его с эталоном. Обнаруженные отклонения (пятна, вмятины, признаки болезней) маркируются как дефекты. Для классификации используется линейная нейросеть, обученная на обширной базе изображений с дефектами.

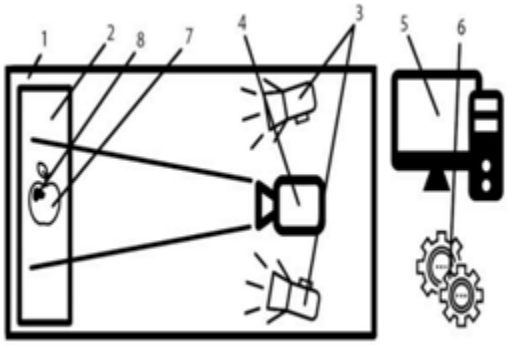


Рисунок 1– Схема стенда для исследования полноцветных изображений поверхности продукции: 1-корпус; 2-подставка; 3- осветители; 4-видеокамера; 5 - компьютер; 6-программное обеспечение; 7-исследуемый плод; 8-пятно повреждения.

Метод на основе гиперспектрального анализа. Он регистрирует непрерывный спектр в диапазоне 400–1000 нм. Это позволяет получать обогащённые данные не только о цвете поверхности, но и о структурных и физиологических изменениях тканей, невидимых для человеческого глаза [3].

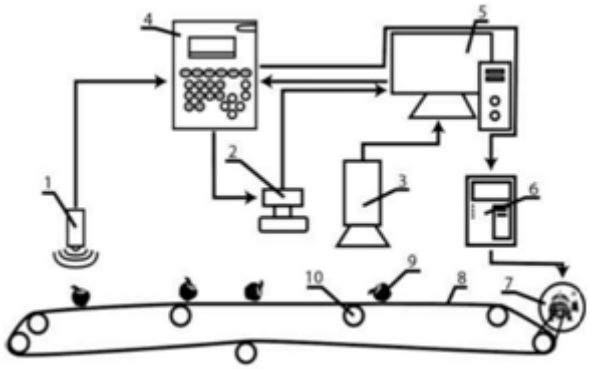


Рисунок 2 – Функциональная схема информационно-измерительной системы контроля качества яблок и макета для их сортировки: 1-конвейер; 2-плоды; 3-камера; 4-система гиперспектрального сканирования; 5-персональный компьютер; 6-ПЛК; 7-актюатор устройства отбраковки; 8-частотный преобразователь; 9-привод конвейера (моторредуктор); 10-емкость для пригодной продукции; 11-емкость дефектной продукции.; 12- датчик скорости.

Метод реализован с помощью специализированной измерительной системы, включающей гиперспектральную камеру, блок сканирования, модуль управления и механизм отбраковки. При движении по конвейеру камера формирует гиперспектральный куб — трёхмерный массив данных с пространственными и спектральными осями. Это позволяет фиксировать отклик тканей в сотнях узких спектральных диапазонов, создавая детализированный профиль отражательных свойств объекта.

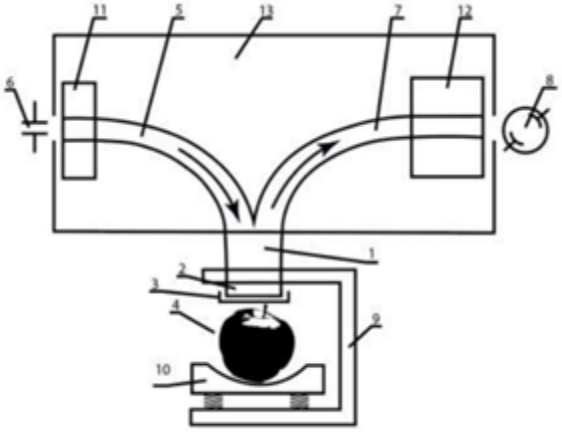


Рисунок 3 – Схема приставки к спектрофотометру СФ-26 для измерения коэффициентов отражения поверхности яблок: 1-световод, 2-общий конец световода, 3-бленда, 4-объект измерения (яблоко), 5-приемный отводок световода, 6-щель спектрофотометра СФ-26, 7- выходной отводок световода, 8-фотоэлемент СФ-26, 9-приспособление для крепления общего конца световода, 10-прижимное устройство объекта измерения, 11-фиксирующее устройство приемного отводка световода, 12-фиксирующее устройство выходного отводка световода, 13-кюветное отделение СФ-26.

Электрические и оптические методы контроля качества. Суть метода заключается в гибридном подходе к неразрушающему контролю качества плодов, сочетающий электрические и оптические измерения. Он направлен не на сортировку по внешним признакам, а на раннее выявление процессов старения, потери тургора и внутренних метаболических изменений, критически важных при хранении и транспортировке фруктов. В основе метода лежат два взаимодополняющих диагностических канала: измерение электрического сопротивления тканей; анализ отражательных и флуоресцентных характеристик кожуры.

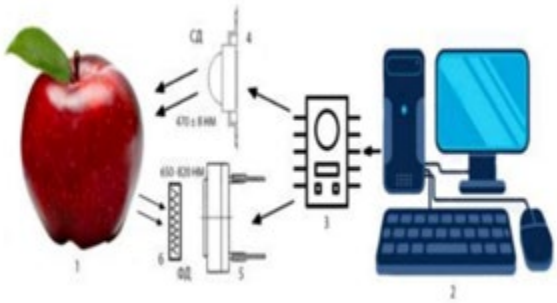


Рисунок 4 – Функциональная схема устройства для контроля степени зрелости плодов: 1 – объект исследования, 2 – светофильтр, 3 – управляемый источник питания СД (светодиода, типа ARPL-3W-EPL40), 4 – усилитель для ФД (фотодиода, типа ФД-7К), 5 – микроконтроллер, 6 – компьютер.

Оптический метод [4] на основе флуоресценции хлорофилла. Метод основан на регистрации флуоресценции хлорофилла. При облучении плода светом определённой длины волны хлорофилл поглощает фотоны и испускает флуоресцентный сигнал в красном и ближнем инфракрасном диапазонах (685 и 735 нм). Интенсивность этого сигнала отражает

функциональное состояние фотосинтетического аппарата и позволяет оценить степень зрелости.

Исходя из проведённого анализа перспективным представляется:

Система технического зрения для распознавания дефектов плодов. Система технического зрения (СТЗ) [5] играет ключевую роль в автоматизации сортировки плодов, позволяя анализировать форму, цвет, размер и поверхностные дефекты. Эти системы исключают субъективный человеческий фактор и особенно важны для производства консервантов, где качество сырья напрямую определяет вкус и срок хранения продукта.

Метод использует комплекс камер и алгоритмы глубокого обучения для классификации внешних дефектов. Однако, несмотря на преимущества СТЗ имеет ряд ограничений, она: не способна оценить внутренние повреждения плодов; чрезмерно отбраковывает яблоки с незначительными дефектами кожуры; не подходит для точной оценки степени поражения гнилью.

Альтернативный подход со сверточной нейронной сетью - точность 96,88% - также имеет ограничения: не оценивает площадь повреждений; требует дообучения для новых сортов и дефектов; склонен к переобучению

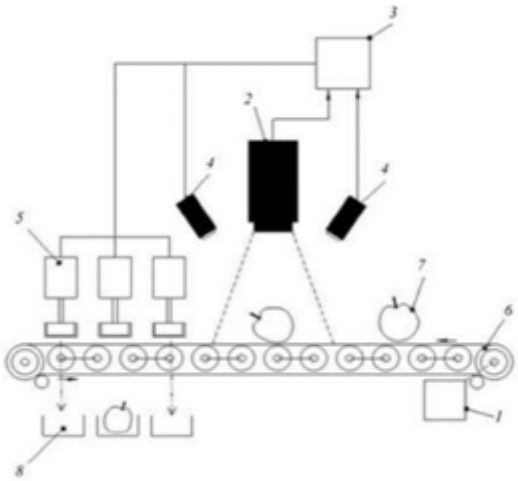


Рисунок 5 – Схема конвейера-классификатора яблок. 1- конвейерная лента; 2 – камера технического зрения; 3 – персональный компьютер; 4 – лазерный датчик; 5 – исполнительный механизм; 6 – мотор-редуктор; 7 – плод.

Для преодоления перечисленных ограничений перспективным представляется: разработка методов интерпретации внешних дефектов как индикаторов внутренних повреждений; внедрение комплексного подхода, сочетающего сверточные нейронные сети с алгоритмами нечеткой логики; использование нечеткой логики для оценки степени повреждения в процентных диапазонах [7].

Для эффективной сортировки плодов разработать интеллектуальную систему, объединяющую: компьютерное зрение для анализа изображений; глубокое обучение для классификации дефектов; нечеткую логику для оценки степени повреждения.

Такой подход позволяет точно определять пригодность плодов для переработки, учитывая как внешние дефекты, так и возможные внутренние повреждения.

Разработан алгоритм, который на основе математического моделирования оценивает объем внутреннего повреждения плода гнилью по площади видимого дефекта.

Этапы алгоритма:

- анализ формы: По контуру плода определяются его габариты (R_{min}, R_{max}) и

вычисляется средний радиус (R) для аппроксимации плода сферой.

- анализ дефекта: из маски повреждения извлекается его радиус (r) и расчетная высота (h) для моделирования дефекта в виде полусферы.

- комплексная оценка: рассчитывается площадь поврежденной поверхности (Sповр) и ее доля от общей площади (k_S); объем повреждения оценивается по двум моделям (полусфера и сферический сектор), а итоговое значение ($V_{повр}$) получают усреднением для повышения точности.

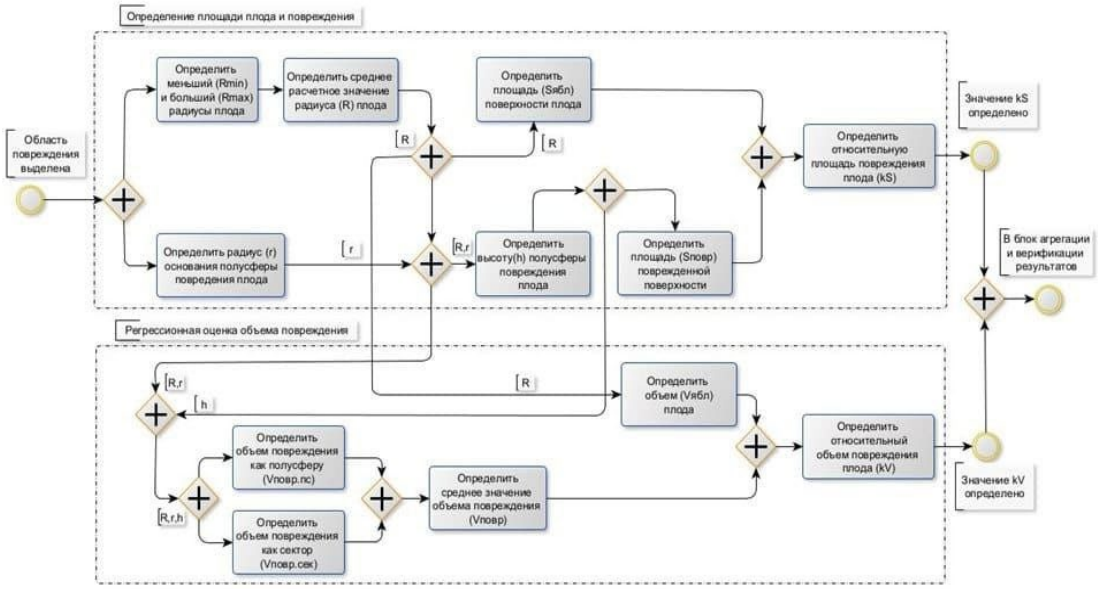


Рисунок 6 – Обобщенный алгоритм управления автоматизированной сортировкой

В конечном итоге алгоритм предоставляет две независимые характеристики — по площади (k_S) и по объему (k_V), что обеспечивает всестороннюю оценку для точной сортировки продукции.

При обучении нейронной сети на языке программирования Phyton могут быть использованы библиотеки OpenCV-Python, PIL (Pillow), NumPy, Scikit-image, которые применяются для цифрового анализа изображений.

Заключение. На основании проведенного анализа предложен алгоритм автоматизированной сортировки плодоовощной продукции для существующих методов. Установлено, что использование системы интеллектуального контроля, связывающей машинное зрение, статистические данные и средства обработки с использованием алгоритмов нечеткой логики, позволит значительно повысить качество хранящейся продукции, а также консервантов.

Список использованных источников:

1. Дубовицкий А.А., Климентова Э.А., Григорьева Л.В. Анализ современного состояния отрасли садоводства в России и перспективы развития на основе реализации рыночного потенциала // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2022. Т. 15, N 4(75). С. 124–138. EDN: GKOJZL. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_124.

2. Милонова М.В., Астапенко А.А. Влияние санкций на аграрно-промышленный комплекс России // *Международная торговля и торговая политика*. 2023; 9(3):127-133. EDN: GMPGGF. DOI: 10.21686/2410-7395-2023-3-127-133.

3. Панин А.В., Тимохин Д.В., Головина Л.А., Логачева О.В. Цифровая индустрия и цифровые возможности в АПК: состояние, потенциал и тренды / *Экономика сельского хозяйства России*. 2021. № 11. С. 26-31. EDN: ENVGNR. DOI: 10.32651/2111-26.

4. Эпштейн Д.Б. О развитии АПК на основе цифровой трансформации / *Российский экономический журнал*. 2023. № 5. С. 46-62. EDN: TUNQSH. DOI: 10.52210/0130-9757_2023_5_46.

5. Dijkman R.M., Dumas M., Ouyang C. Semantics and analysis of business process modelsin BPMN // Information and Software technology. 2008. Vol. 50. N12. – P. 1281–1294. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.02.006

6. Lu Y., Lu R. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples. *Transactions of the ASABE*, 2017, vol. 60, N 4, pp. 1379-1389. https://doi.org/10.13031/trans.12158.

7. Vidnerova P., Neruda R. Evolving Keras Architectures for Sensor Data Analysis // *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems.* pp. 109–112. ACSIS, Vol. 11. DOI: 10.15439/2017F241.

Bibliography

1. Dubovitsky A.A., Klimentova E.A., Grigorieva L.V. Analysis of the current state of the horticulture industry in Russia and development prospects based on the realization of market potential//Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2022. T. 15, N 4(75). C. 124–138. EDN: GKOJZL. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_124.

2. Milonova M.V., Astapenko A.A. Impact of sanctions on the agricultural and industrial complex of Russia//International trade and trade policy. 2023; 9(3):127-133. EDN: GMPGGF. DOI: 10.21686/2410-7395-2023-3-127-133.

3. Panin A.V., Timokhin D.V., Golovina L.A., Logacheva O.V. Digital industry and digital opportunities in the agro-industrial complex: state, potential and trends/Economy of agriculture of Russia. 2021. № 11. S. 26-31. EDN: ENVGNR. DOI: 10.32651/2111-26.

4. Epstein D.B. On the development of the agro-industrial complex based on digital transformation/Russian Economic Journal. 2023. № 5. S. 46-62. EDN: TUNQSH. DOI: 10.52210/0130-9757_2023_5_46.

5. Dijkman R.M., Dumas M., Ouyang C. Semantics and analysis of business process modelsin BPMN // Information and Software technology. 2008. Vol. 50. N12. – P. 1281–1294. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.02.006

6. Lu Y., Lu R. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples. *Transactions of the ASABE*, 2017, vol. 60, N 4, pp. 1379-1389. https://doi.org/10.13031/trans.12158.

7. Vidnerova P., Neruda R. Evolving Keras Architectures for Sensor Data Analysis // *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems.* pp. 109–112. ACSIS, Vol. 11. DOI: 10.15439/2017F241.

Шпиндлер Людмила Сергеевна, студентка 3 курса института механики и энергетики имени В.П.Горячкина, ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева,
lyuda.shpindler@yandex.ru
Научный руководитель – Четвериков Евгений Александрович, к.т.н., доцент, доцент

кафедры автоматизации и роботизации имени академика И.Ф. Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева, e.chetverikov@rgau-msha.ru

MODERN METHODS OF DIGITALIZED ASSESSMENT OF FRUIT AND VEGETABLE PRODUCTS QUALITY

Shpindler L. S., E. A. Chetverikov

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Abstract. A significant increase in the computing power of microprocessor devices made it possible to integrate into existing production processes systems for intelligent processing and analysis of data obtained from objective controls. The article analyzed such methods for automated sorting of fruits and vegetables in order to determine the possibility of developing equipment and software for digital quality assessment. Methods based on color television sensors, hyperspectral analysis, hybrid electro-optical methods and chlorophyll fluorescence method are considered. Their advantages and limitations are defined. As a result, an automated sorting algorithm based on the complex use of vision systems, deep learning algorithms and fuzzy logic is proposed. It was found that this approach will increase the accuracy of determining the suitability of fruits for processing, taking into account both external defects and the assessment of possible internal damage.

Keywords: vision system, hyperspectral analysis, fuzzy logic, neural network, automated sorting.

Lyudmila Sergeevna Shpindler, third-year student at the V.P. Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering, Timiryazev Russian State Agrarian University–Moscow Agricultural Academy, lyuda.shpindler@yandex.ru

Academic Supervisor: Evgeny Aleksandrovich Chetverikov, PhD, Associate Professor, and Associate Professor of the I.F. Borodin Department of Automation and Robotics, Timiryazev Russian State Agrarian University–Moscow Agricultural Academy, e.chetverikov@rgau-msha.ru

УДК 338.312

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА 2005-2015 ГОДЫ

Шалимов В.О.

Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Россия, Москва

Аннотация. *Для сельского хозяйства энергоресурсы являются одной из основных статей затрат, и рациональное их использование – важный фактор конкурентоспособности. В сельском хозяйстве России продолжаются трансформации, что проявляется и в изменении спроса на энергоресурсы. В литературе можно встретить разные позиции – что развитие сельского хозяйства должно приводить к экономии энергопотребления, или что развитие сельского хозяйства должно требовать опережающего роста энергогенерации. Был проведён анализ энергопотребления в сельском хозяйстве Тульской области на периоде 2005-2015 с сопоставлением с областными показателями сельского хозяйства. Выбор региона и периода обусловлен наличием данных – сотрудниками ИНП РАН ранее были составлены балансы топливно-энергетических ресурсов Тульской области на 2005, 2010 и 2015 с выделением сектора сельского хозяйства. Анализ показал, что региональная специфика значима, и структура энергопотребления в сельском хозяйстве региона сильно отличается от среднероссийской. Эта структура со временем менялась, шло замещение электричества на газ и тепло. На 2015 год энергоёмкость продукции сельского хозяйства в Тульской области и по России в целом почти совпадали – около 7 тонн условного топлива на 1 млн. руб. продукции. Сделан вывод, что сценарии развития сельского хозяйства могут подразумевать как рост, так и снижение энергопотребления. Отмечено, что потребность в энергии приводит к пространственному предпочтению размещения сельхозпредприятий и усиливает тенденции концентрации хозяйственной деятельности вблизи относительно крупных населённых пунктов.*

***Ключевые слова**:* Тульская область; сельское хозяйство; выпуск; энергопотребление; энергоёмкость.

Введение. Существенные изменения в энергопотреблении происходят в российском сельском хозяйстве с момента либерализации цен после распада СССР. Как отмечено в работах [1, 2] цены на энергоресурсы и удобрения росли более высокими темпами, чем цены на продукты сельского хозяйства. Доля энергоресурсов в себестоимости продукции значительно выросла, и для сельского хозяйства стали актуальны «ножницы цен», что предопределило кризисные явления в этом секторе. Объёмы производства сельхозпродукции снижались вплоть до 1998 года, а их восстановление до уровня 1990 произошло только в 2015 [2]. Отмечается, что эффективность использования энергоресурсов в России в 90ые годы была в разы ниже в сравнении с США и другими развитыми странами (следствие недостаточной эффективности советской организации экономики) [2, 3, 4]. На протяжении уже более 30 лет происходит адаптация с/х сектора под рыночные условия. И изменения в энергопотреблении сектора, видимо, будут длиться ещё десятилетия, что связано уже не

столько с преодолением «родовых травм» российской экономики, сколько с разработкой и внедрением современных технологий ведения сельского хозяйства, технологий автономного снабжения (в т.ч. на базе ВИЭ), экономии энергии и переработки вторичных продуктов.

Факт развития современного сельского хозяйства доказывает, что накануне либерализации цен сектор действительно имел потенциал для повышения энергоэффективности, однако реализация этого потенциала требовала вложений и времени. Сейчас вопрос цен на энергоресурсы стоит не так остро, тем не менее, рациональное использование ресурсов остаётся фактором конкурентоспособности отдельных предприятий и развития всей отрасли. В работе [5] приведены данные, что полные энергозатраты в с/х (включая затраты на производство кормов, удобрений и др.) составляют значительные 25…30% от себестоимости с/х продукции.

Количественная связь между показателями выпуска в с/х и энергопотреблением рассматривалась, например, в работах [2, 6, 7]. В работе [2] были приведены ряды энергопотребления сельским хозяйством с 1990 по 2018 и сделан прогноз до 2030 года; приведены оценки доли энергии в себестоимости продукции и энергоёмкость производства различных видов с/х продукции; сказано, что дальнейшее повышение производства с/х продукции потребует опережающих затрат энергоресурсов. В работе [6] приведена структура себестоимости с/х продукции в Курганской области; рассмотрена корреляция финансовых результатов организаций и цен на энергоресурсы; указано, что корреляция слаба. В работе [7] приведена типология регионов на основе доли электроэнергии, потребляемой региональным с/х, динамики прироста внутренней генерации и с/х производства; указано, что корреляция между динамикой внутренней генерации и динамикой с/х выпуска мала.

В упомянутых работах *априорно* полагалось, что связь между общим энергопотреблением и с/х выпуском должна быть, но представляется, что эту связь надо выяснить. Это следствие сложности анализа современного с/х – оно многоукладно и технологически разнородно. Особенностью анализа в данной работе является попытка увязать энергопотребление не только с интегральным показателем выпуска с/х продукции, но и с более узкими отраслевыми показателями.

Цель исследований. Целью работы является поиск связи между показателями энергопотребления и функционирования отрасли для углубления понимания ресурсных возможностей и ограничений развития сельского хозяйства.

Материалы и методы. Анализ был проведён для Тульской области и для периода 2005-2015 ввиду участия сотрудников ИНП РАН в разработке Стратегии социально-экономического развития Тульской области и погружения в специфику местных энергетики и сельского хозяйства. В частности, для области были построены топливно-энергетические балансы на 2005, 2010 и 2015 годы [8]. Для анализа также использовалась государственная статистика по с/х России и Тульской области, а также экспертные сообщения о с/х технологиях. Поскольку точное потребление энергии по разным сегментам с/х не известно, а также не известны технологические особенности действующих предприятий, то анализ связи может быть только качественным.

Результаты и обсуждение. Прежде всего, посмотрим на энергопотребление в сельском хозяйстве России в целом на рассматриваемом период 2005-2015 (рис. 1). Основное изменение – снижение общего потребления энергоресурсов в секторе, главным образом за счёт снижения потребления нефтепродуктов. Это понижение не может быть объяснено снижением объемов деятельности, поскольку посевные площади не менялись – колебались в диапазоне 75…78 млн. га между 2005 и 2015, и в целом выпуск в с/х рос – цепные индексы

производства с/х продукции с 2006 по 2015 составляют 1,32 и 1,31 для животноводства и растениеводства России соответственно.

Т.е. снижение энергопотребления должно быть связано с внедрением экономичной техники и энергосберегающих технологий. Согласно Росстату парк основных видов техники в сельскохозяйственных организациях существенно сократился – в частности, количество тракторов снизилось с 480 тыс. шт. в 2005 до 233 тыс. шт. к 2015. Хозяйства нуждались в обновлении техники, причём покупалась более производительная техника. Обновление парка происходило как за счёт собственных средств аграриев, так и за счёт «Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2008–2012 годы». Также, вероятно, шла замена дизельных систем отопления и сушки зерна на газовые, поэтому потребление газа постепенно росло. Другим фактором может быть снижение с/х деятельности в удалённых районах и смещение её ближе к крупных населённым пунктам – так снижались транспортные расходы, и, соответственно, потребление нефтепродуктов.

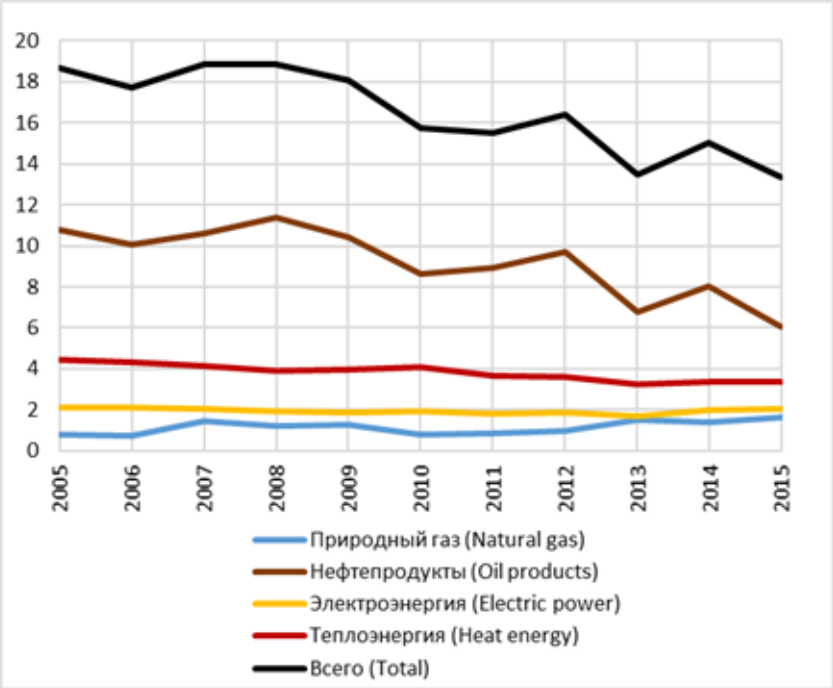


Рисунок 1 - Потребление в секторе по России, млн. т.у.т. На основе баланса энергоресурсов по России, публикуемого Росстатом, https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/balans_energo_2005-2021.xlsx

В Тульской области общего снижения потребляемых энергоресурсов не было, а структура потребления отличалась от среднероссийской (рис. 2) даже несмотря на то, что в 2005 соотношение между продукцией животноводства и растениеводства было близко к среднероссийскому. Замечаем, что в области основным потребляемым энергоресурсом в 2005 году была электроэнергия, и в дальнейшем происходило её замещение другими видами энергии. Можно предположить, что на территории области исторически сложилась практика широкого использования электричества (отопление ферм, обогрев защищенного грунта, сушка сельскохозяйственного сырья и др.), что часто не является экономически оптимальным, особенно в сельской местности [9]. В работе [11], касающейся Новосибирской области, утверждается, что 87…92% ферм (на 2022 год) с поголовьем до 1000 голов крупного рогатого скота применяют электроотопление, тогда как поступающее в хозяйства

котельно-печное топливо расходуется для отопления ремонтных мастерских, гаражей, контор и других подсобных помещений. Так могло быть и в Тульской области. Соответственно, снижение электропотребления в Тульской области объясняется постепенным переводом отопления ферм на газовое или централизованное, а также прекращением работы некоторых ферм: выпуск в животноводстве Тульской области снижался – за период с 2005 по 2015 доля животноводства в выпуске с/х продукции области сократилась с 52% до 28%. При этом количество голов КРС сократилось со 150 тыс. до 90 тыс., а свиней – со 140 тыс. до 90 тыс. Животноводческие фермы могли закрываться вынужденно в том числе вследствие некачественной работы электросетей (скачки напряжения, разрывы).

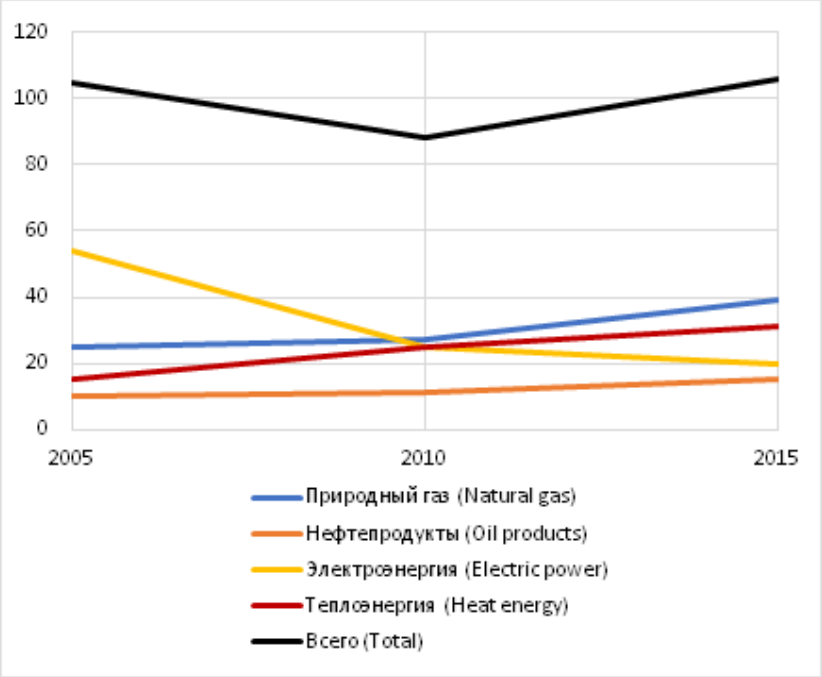


Рисунок2 - Потребление энергоресурсов в секторе "Сельское хозяйство, рыболовство и рыбоводство" Тульской области, тыс. т.у.т. По данным из [7]

Примечательным является рост потребления теплоэнергии. Согласно данным по статистическим формам 1-ТЭП в Тульской области с 2005 по 2015 протяженность тепловых и паровых сетей сократилась: с 2074 км в двухтрубном исчислении до 1850 км. Т.е. рост теплопотребления происходил не при расширении сети теплоснабжения, а, видимо, при перемещении с/х объектов (объектов животноводства) ближе к населённым пунктам, имеющим централизованное отопление. Может новые фермы и не открывались, но прирост стада происходил только в ближних фермах. В качестве примера отметим, что современные крупнейшие свиноводческие фермы Тульской области расположены вблизи муниципальных центров: ПХ «Лазоревское» – в 1ом километре от посёлка Лазоревское, а ферма ООО «ГК АгроЭко» в Куркинском районе – на расстоянии 4 км от посёлка Куркино.

Рост расходов на теплообеспечение в животноводстве – важный технологический аспект. В птицеводстве и свиноводстве современные породы требуют особого температурного режима на разных стадиях роста, что обеспечит полноту реализации генетического потенциала породы. Современная генетика направлена на уменьшение слоя подкожного жира, что приводит к большей зависимости продуктивности и здоровья животных от окружающей температуры. Установлено, что при холодном способе содержания свиней снижаются привесы, увеличивается толщина шпика, увеличивается

падёж животных. Расход кормов при пониженной температуре на компенсацию теплопотерь телом животного по стоимости в несколько раз превышает затраты на подачу тепла [12]. В данном случае рост затрат на обогрев и повышение «теплоёмкости» продукции будет экономически рациональным для хозяйства – показатель привеса животных на 1 кг корма по Тульской области существенно вырос (рис. 3).

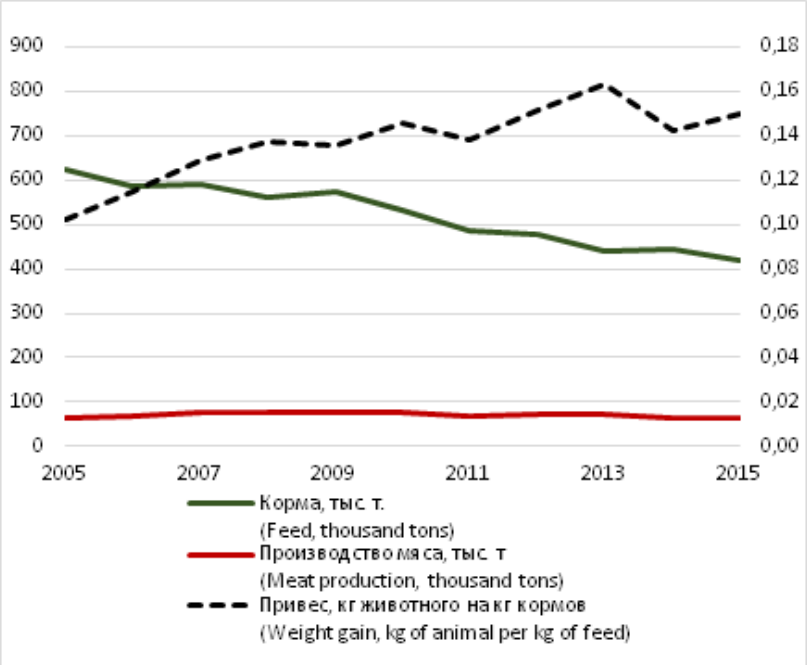


Рисунок 3 - Потребление кормов в животноводстве Тульской области, производство мяса и расчётный показатель привеса. Шкала привеса – справа. На основе данных Росстата.

Сравним энергоёмкость продукции с/х в Тульской области и по России (рис. 4). И там, и там показатель энергоёмкости продукции с/х снижался. На 2005 год в области он был существенно ниже, чем по России, но в дальнейшем снижение шло медленнее, и на 2015 значения почти сравнялись.

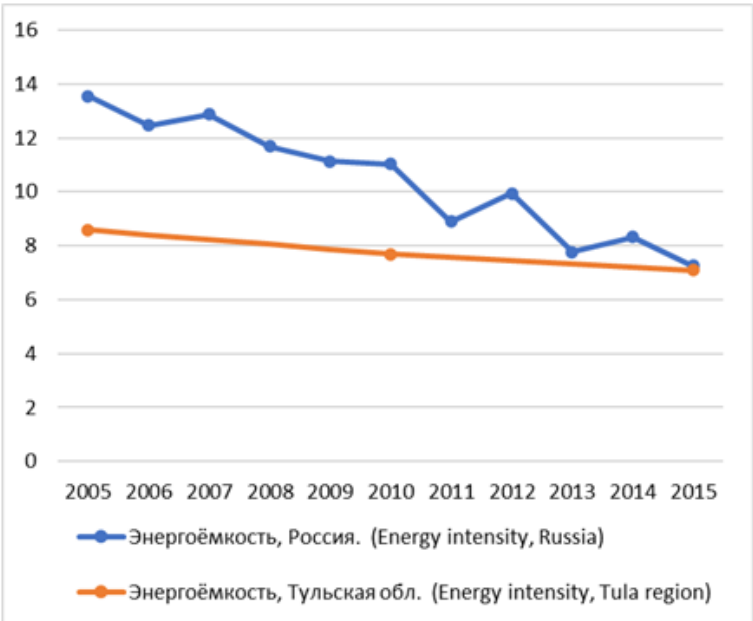


Рисунок 4 - Энергоёмкость производства сельскохозяйственной продукции, т.у.т на 1 млн. руб. с/х продукции (сопоставимые цены 2005). Расчёт автора.

Снижение этого показателя происходило на фоне роста выпуска продукции с/х. Для

России оказалось неверным утверждение из [4], что «потребность в энергоресурсах удваивается через 10-15 лет, поскольку прирост сельскохозяйственной продукции на 1% требует увеличение расходов энергоресурсов на 2-3%». Следует признать, что с/х сектор является разнородным: для некоторой группы производителей существует потенциал снижения энергопотребления, и повышение эффективности подразумевает снижение энергоёмкости процессов, а для другой группы производителей – действительно, дальнейший рост эффективности означает опережающий спрос на энергоресурсы. Возможно, в дальнейшем тренд на снижение энергоёмкости в российском с/х и изменится. Отметим, что за период между сельскохозяйственными переписями 2006 и 2016 количество с/х организаций по России сократилось с 59208 до 36048, а по Тульской области – с 837 до 536. Определённо, энергоэффективность предприятий была одним из факторов конкурентного отбора хозяйств.

Выводы.

1. В Тульской области и России в целом энергоёмкость с/х продукции сокращалось, более того, по России в целом потребление энергии снижалось на фоне роста выпуска в с/х. На это влиял как переход к современным технологиям ведения хозяйства, так и мероприятия по непосредственной экономии энергии. Монотонность убывания этой величины подтверждает, что доступные энергоресурсы являются одним из главных факторов конкурентоспособности с/х производителей;

2. Особенность Тульской области заключалась в высоком потреблении электроэнергии сельским хозяйством, и впоследствии этот вид энергии замещался газом и теплом централизованного отопления. Данная особенность могла стать значимым фактором, предопределившим снижение выпуска в животноводстве области в 2000ых и 2010ых;

3. Проведённый анализ показал, что развитие с/х не всегда означает монотонное снижение энергоемкости продукции – некоторые технологические сдвиги подразумевают рост энергопотребления при росте производительности. Т.е. прямое сопоставление энергоемкости и выпуска в отрасли без анализа применяемых технологий может приводить к некорректным выводам. Сценарии развития с/х могут подразумевать как рост, так и снижение энергопотребления в зависимости от гипотез технологического развития и замещения энергоресурсов;

4. Фактор доступности энергоресурсов порождает пространственный эффект тяготения с/х производств к достаточно крупным населённым пунктам, имеющим надёжные электрические сети высокого напряжения, газопровод и централизованное отопление. Т.е. рыночная логика подталкивает предпринимателей к концентрации с/х деятельности вблизи административных центров. Соответственно, это один из факторов ухода товарного с/х производства из удалённых периферийных сёл.

Список использованных источников

1. Ползиков Д.А. «Ценовые пропорции развития сельского хозяйства России в контексте отраслевой и макроэкономической политики»: дис. … канд. экон. наук 08.00.01, 08.00.05. ИНП РАН. 2014. 170 с. https://ecfor.ru/publication/tsenovye-proportsii-razvitiya-selskogo-hozyajstva-rossii/

2. Стребков Д.С., Тихомиров Д.А., Тихомиров А.В. Показатели потребления топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве и энергоемкости сельхозпроизводства, их прогноз на период до 2030 года // Техника и технологии в животноводстве. 2018. №4 (32).

URL: https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-potrebleniya-toplivno-energeticheskih-resursov-v-selskom-hozyaystve-i-energoemkosti-selhozproizvodstva-ih-prognoz-na-period.

3. Чиркова И.Г. «Организация эффективного энергообеспечения агропромышленного производства Сибири»: дис. … док. экон. наук 08.00.05. ИЭОПП СО РАН. 2015. 331 с.

4. Нигматуллин Р.М. Структура энергопотребления и направления энергосбережения в системе АПК / Р.М. Нигматуллин, Э.В. Шамсутдинов, Ю.Г. Назмеев // Труды Академэнерго. 2006. № 2. С. 123-132. EDN KWUUCP

5. Тихомиров Д. А. Показатели энергоэффективности сельхозпроизводства и перспективные направления их роста / Д. А. Тихомиров // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 5(275). – С. 32-37. – DOI 10.33267/2072-9642-2020-5-32-37. – EDN ISDCDT.

6. Артамонова И.А., Медведева Т.Н., Батурина И.Н. Влияние энергозатрат на финансовые результаты деятельности сельскохозяйственных организаций Курганской области. // В составе сборника: Приоритетные направления развития энергетики в АПК: Сборник статей по материалам II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Курган, 22 февраля 2018 года / Под общей редакцией С.Ф. Сухановой. – Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2018. – 291 с. – EDN XUMBPV.

7. Белов В.И. Государственное управление повышением энергоэффективности сельскохозяйственных регионов Российской Федерации // Государственное управление. Электронный вестник. 2024. №104. https://cyberleninka.ru/article/n/gosudarstvennoe-upravlenie-povysheniem-energoeffektivnosti-selskohozyaystvennyh-regionov-rossiyskoy-federatsii

8. Саенко В.В., Колпаков А.Ю., Семикашев В.В., Синяк Ю.В. Опыт анализа и прогнозирования энергетического сектора региона (на примере Тульской области) // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2017. №15. https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-analiza-i-prognozirovaniya-energeticheskogo-sektora-regiona-na-primere-tulskoy-oblasti

9. Загоровская В. В поисках энергии. Аграрии вынуждены строить собственные энергоцентры // «Агротехника и технологии» №06. 2023. https://www.agroinvestor.ru/analytics/article/41408-v-poiskakh-energii-agrarii-vynuzhdeny-stroit-sobstvennye-energotsentry/

10. Перова М.Б. Экономические проблемы и перспективы качественного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей в России // Материалы открытого семинара «Экономические проблемы энергетического комплекса» 27 февраля 2007. Москва. ИНП РАН. https://ecfor.ru/wp-content/uploads/seminar/energo/z78.pdf

11. Чиркова И.Г., Бикейкина И.А., Гончарова М.А. Тенденции изменения энергоемкости продукции агропродовольственного сектора экономики в период импортозамещения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 4 (56). С.168-177. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50081889

12. Сравнительный анализ систем отопления свиноводческих ферм и комплексов. [электронный ресурс] Сайт компании АгроПроектИнвест. https://www.new.agroproj.msk.ru/assets/files/Analiz-sistemotopleniyasvinokompleksov.pdf

References

1. Polzikov D.A. «Cenovye proporcii razvitija sel'skogo hozjajstva Rossii v kontekste otraslevoj i makrojekonomicheskoj politiki»: dis. … kand. jekon. nauk 08.00.01, 08.00.05. INP RAN. 2014. 170 s. https://ecfor.ru/publication/tsenovye-proportsii-razvitiya-selskogo-hozyajstva-

rossii/

2. Strebkov D.S., Tihomirov D.A., Tihomirov A.V. Pokazateli potreblenija toplivno-jenergeticheskih resursov v sel'skom hozjajstve i jenergoemkosti sel'hozproizvodstva, ih prognoz na period do 2030 goda // Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve. 2018. №4 (32). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-potrebleniya-toplivno-energeticheskih-resursov-v-selskom-hozyaystve-i-energoemkosti-selhozproizvodstva-ih-prognoz-na-period.

3. Chirkova I.G. «Organizacija jeffektivnogo jenergoobespechenija agropromyshlennogo proizvodstva Sibiri»: dis. … dok. jekon. nauk 08.00.05. IJeOPP SO RAN. 2015. 331 s.

4. Nigmatullin R.M. Struktura jenergopotreblenija i napravlenija jenergosberezhenija v sisteme APK / R.M. Nigmatullin, Je.V. Shamsutdinov, Ju.G. Nazmeev // Trudy Akademjenergo. 2006. № 2. S. 123-132. EDN KWUUCP

5. Tihomirov D. A. Pokazateli jenergojeffektivnosti sel'hozproizvodstva i perspektivnye napravlenija ih rosta / D. A. Tihomirov // Tehnika i oborudovanie dlja sela. – 2020. – № 5(275). – S. 32-37. – DOI 10.33267/2072-9642-2020-5-32-37. – EDN ISDCDT.

6. Artamonova I.A., Medvedeva T.N., Baturina I.N. Vlijanie jenergozatrat na finansovye rezul'taty dejatel'nosti sel'skohozjajstvennyh organizacij Kurganskoj oblasti. // V sostave sbornika: Prioritetnye napravlenija razvitija jenergetiki v APK : Sbornik statej po materialam II Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoj konferencii, Kurgan, 22 fevralja 2018 goda / Pod obshhej redakciej S.F. Suhanovoj. – Kurgan: Kurganskaja gosudarstvennaja sel'skohozjajstvennaja akademija im. T.S. Mal'ceva, 2018. – 291 s. – EDN XUMBPV.

7. Belov V.I. Gosudarstvennoe upravlenie povysheniem jenergojeffektivnosti sel'skohozjajstvennyh regionov Rossijskoj Federacii // Gosudarstvennoe upravlenie. Jelektronnyj vestnik. 2024. №104. https://cyberleninka.ru/article/n/gosudarstvennoe-upravlenie-povysheniem-energoeffektivnosti-selskohozyaystvennyh-regionov-rossiyskoy-federatsii

8. Saenko V.V., Kolpakov A.Ju., Semikashev V.V., Sinjak Ju.V. Opyt analiza i prognozirovanija jenergeticheskogo sektora regiona (na primere Tul'skoj oblasti) // Nauchnye trudy: Institut narodnohozjajstvennogo prognozirovanija RAN. 2017. №15. https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-analiza-i-prognozirovaniya-energeticheskogo-sektora-regiona-na-primere-tulskoy-oblasti

9. Zagorovskaja V. V poiskah jenergii. Agrarii vynuzhdeny stroit' sobstvennye jenergocentry // «Agrotehnika i tehnologii» №06. 2023. https://www.agroinvestor.ru/analytics/article/41408-v-poiskakh-energii-agrarii-vynuzhdeny-stroit-sobstvennye-energotsentry/

10. Perova M.B. Jekonomicheskie problemy i perspektivy kachestvennogo jelektrosnabzhenija sel'skohozjajstvennyh potrebitelej v Rossii // Materialy otkrytogo seminara «Jekonomicheskie problemy jenergeticheskogo kompleksa» 27 fevralja 2007. Moskva. INP RAN. https://ecfor.ru/wp-content/uploads/seminar/energo/z78.pdf

11. Chirkova I.G., Bikejkina I.A., Goncharova M.A. Tendencii izmenenija jenergoemkosti produkcii agroprodovol'stvennogo sektora jekonomiki v period importozameshhenija // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. 2022. T. 14. № 4 (56). S.168-177. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50081889

12. Sravnitel'nyj analiz sistem otoplenija svinovodcheskih ferm i kompleksov. [jelektronnyj resurs] Sajt kompanii AgroProektInvest. https://www.new.agroproj.msk.ru/assets/files/Analiz-sistemotopleniyasvinokompleksov.pdf

Шалимов Валентин Олегович, мл. науч. сотр., Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Россия, Москва.
v-shalimov@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-9000-9081

ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS IN AGRICULTURE IN THE TULA REGION 2005-2015

Shalimov Valentin Olegovich

The Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Energy resources are one of the main cost items in agriculture. Rational use of them is an important factor in competitiveness. Transformations are continuing in Russia's agriculture, demand for energy resources changes also. There are different hypotheses – that the development of agriculture should lead to savings in energy consumption, or that the development of agriculture should require faster growth in energy generation. An analysis of energy consumption in agriculture in the Tula region for the period 2005-2015 was carried out, compared with regional agricultural indicators. The choice of region and period is determined by the availability of data – balances of fuel and energy were made by the staff of IEF RAS for the Tula region for 2005, 2010 and 2015 with pointing out of the agricultural sector. The analysis showed that regional specifics are significant, and the structure of energy consumption in the region differs from the average Russian one. This structure changed over time, with electricity being replaced by gas and heat. In 2015, the energy intensity of agricultural products in the Tula region and in Russia as a whole almost coincided – about 7 tons of conventional fuel per 1 million rubles of products. It is concluded that agricultural development scenarios may imply both an increase and a decrease in energy consumption. It is noted that the need for energy leads to a spatial preference in location of agricultural facilities and supports concentration of economic activity near relatively large settlements.

Keywords: Tula region; agriculture; production; energy consumption; energy intensity.

Shalimov Valentin Olegovich, Junior Researcher, The Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences
v-shalimov@ya.ru

УДК 621.224.4; 620.91

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРА ПИРОЛИЗНОЙ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ

Г.Н. Узаков, С.Г. Маматкулова

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. В данной работе представлено исследование, направленное на оптимизацию режимных параметров конденсатора пиролизной биоэнергетической установки, предназначенной для термической переработки биомассы. Учитывая важность эффективной конденсации парогазовой смеси, поступающей из реактора установки, особое внимание уделено моделированию теплообмена в спиральном змеевике с учетом фазового перехода. Разработана физико-математическая модель, основанная на энергетическом балансе, уравнении Клаузиуса–Клапейрона и логарифмическом температурном напоре в противоточной схеме. В качестве метода решения применена многоцелевая байесовская оптимизация, позволяющая находить компромисс между максимальным тепловым потоком и минимальным расходом охлаждающей воды. Программная реализация алгоритма выполнена на языке Python с использованием библиотеки *scikit-optimize*. В результате численного эксперимента определено оптимальное значение массового расхода охлаждающей воды (≈0,03 кг/с), при котором достигается максимальный тепловой поток (≈4389 Вт). Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и обосновывают его применимость в задачах повышения энергетической эффективности маломасштабных пиролизных биоэнергетических установок. Представленные методические и расчетные решения могут быть использованы в инженерной практике при проектировании теплотехнического оборудования для переработки аграрной и древесной биомассы.

Ключевые слова: пиролиз; теплообмен; Байесовская оптимизация; спиральный змеевик; конденсатор-теплообменник; математическое моделирование; тепловой поток, массовый расход воды.

Введение. Актуальность проблемы утилизации органических отходов сельского хозяйства неизменно возрастает на фоне глобальных климатических вызовов, роста энергопотребления и необходимости перехода к замкнутому углеродному циклу. Одним из эффективных решений, сочетающих в себе экологические и энергетические преимущества, является термическая переработка биомассы методом пиролиза, обеспечивающая получение биоэнергетических продуктов: твердого топлива (биоугля), жидкой фракции (биомасла) и горючих газов [1,2,3].

Особое внимание в современных исследованиях уделяется на выход продуктов пиролиза, поскольку они могут использованы в качестве биотоплива, либо сырья для химического синтеза. Однако выход и качество продуктов пиролиза существенно зависят от эффективности процессов охлаждения и конденсации парогазовой смеси. Именно поэтому оптимизация режимных параметров конденсатора пиролизной установки представляет собой важнейшую инженерную задачу, от решения которой зависит как технологическая, так и экономическая эффективность всей установки [4,5].

По данным ряда авторов, ключевыми параметрами, определяющими интенсивность и полноту конденсации, являются: температура охлаждающей среды, геометрия теплообменных поверхностей, скорость потока парогазовой смеси и материал конденсатора [6,7]. Исследование автора [8] показало, что снижение температуры охлаждающей среды в трубчатом конденсаторе до 12–14 °C позволяет увеличить выход жидкой фракции на 15–20 % при неизменном составе биомассы.

В обзоре [1] подчеркивается, что успешное масштабирование процессов пиролиза требует не только контроля тепловых условий реактора, но и тонкой настройки систем конденсации, включая температуру, геометрию и скорость охлаждающего потока. Автор указывает, что каскадная схема с последовательным снижением температуры конденсаторов позволяет добиться фракционного разделения жидких продуктов.

Авторы [4] провели численное и экспериментальное исследование конденсации продуктов пиролиза с различными теплообменными конфигурациями. Результаты показали, что эффективность теплообмена существенно зависит от угла потока, площади охлаждения и распределения температуры вдоль поверхности.

Работа [6] использует метод отклика поверхности (RSM) для оптимизации температуры охлаждающей воды. Авторы получили максимальный выход жидкой фазы при температуре 15 °C и времени контакта около 4 секунд, что подтверждает важность точной настройки параметров.

Исследователи [5] моделируют процессы охлаждения пиролизных газов с использованием пакетов ANSYS и COMSOL. В ходе численного эксперимента выявлены предельные параметры температуры стенки, при которых обеспечивается полная конденсация. А авторы [7] исследуют зависимость эффективности конденсации от температуры входной воды. В экспериментальной установке показано, что снижение температуры до 10–12 °C повышает выход жидкой фазы на 20–22 %.

Несмотря на накопленные знания, в современной литературе ощущается дефицит систематизированных подходов к многофакторной оптимизации параметров конденсации с учетом различий в типах биомассы, масштабах установки и целевых продуктах. Отдельного внимания заслуживает применение методов математического моделирования и экспериментального дизайна для нахождения оптимальных режимов.

Целью настоящего исследования является определение оптимальных режимных параметров работы конденсатора-теплообменника с спиральным змеевиком пиролизной установки, обеспечивающих максимальную эффективность теплообмена при минимальном расходе охлаждающей воды.

Материалы и методы. В конструкции конденсатора-теплообменника, используемого в пиролизной биоэнергетической установке, реализована схема герметичного цилиндрического корпуса с размещённым внутри спиральным змеевиком (см. рис. 1). Принцип действия которого основан на охлаждение парогазовой смеси водой, протекающей внутри трубы змеевика в противопоточном направлении к высокотемпературной парогазовой смеси. Геометрические характеристики конструкции представлены в таблицах 1 и 2.

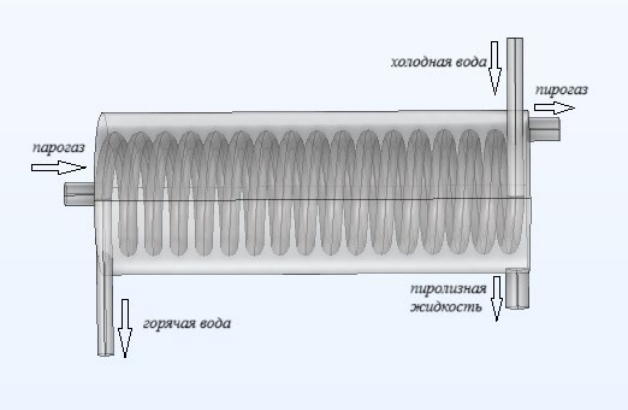


Рисунок 1 - Вид конденсатора-теплообменника ПБЭУ.

Анализ тепловых характеристик системы показал, что температура охлаждающей воды на входе в конденсатор составляет преимущественно 18–20 °C, тогда как на выходе, в зависимости от текущих режимов функционирования установки, может возрастать до 50–70 °C. В то же время температура поступающей парогазовой смеси варьируется в диапазоне 130–200 °C, что обуславливает высокий температурный напор и потенциал для эффективного теплообмена.

Таблица 1 - Геометрические параметры спирального змеевика

Параметр	Обозначение	Единицы	Значения
Длина змеевика	$L_з$	м	0,5
Внутренний диаметр змеевика	$d_{звнут}$	м	0,016
Наружный диаметр змеевика	$d_{звнеш}$	м	0,022
Толщина стенки	δ	м	0,003
Площадь теплообмена	$F_з$	м²	0,55
Объём змеевика	$V_з$	$м^3$	0.003
Длина трубы	$L_{тр}$	м	8
Периметр поперечного сечения	$P_з$	м	0,05
Площадь сечения канала	$F_з$	$м^2$	2.01×10^{-4}

Таблица 2 - Геометрические параметры кожуха конденсатора

Параметр	Обозначение	Единицы	Значения
Длина конденсатора	Lк	м	0,5
Внутренний диаметр кожуха	dквнут	м	0,2
Наружный диаметр кожуха	dкнеш	м	0,21
Толщина стенки	δ	м	0,03
Объем кожуха	Vк	м3	0.0157
Площадь межтрубного пространства	Fк	м²	0,0317
Объём свободный	Vсв	м3	0,0127

Теплофизические характеристики воды и ПС приведены в табл.3 и табл.4.

Таблица3 - Теплофизические характеристики охлаждающей воды (в спиральной трубе)

Параметр	Обозначение	Единицы	Значения
Температура на входе	$T_{в}^{вх}$	°C	18-20
Массовый расход	$G_{в}$	кг/с	0,01-0,05
Плотность	$\rho_{в}$	кг/м³	998.6-998.2
Теплоёмкость	$ср_{в}$	Дж/(кг·К)	4190
Теплопроводность	$\lambda_{в}$	Вт/(м·К)	0,595–0,598
Динамическая вязкость	$\mu_{в}$	Па·с	1,109·103-1,003·103

Таблица 4 - Теплофизические характеристики ПС (в кожухе)

Параметр	Обозначение	Единицы	Значения
Температура на входе	$T_{п}^{вх}$	°C	130-200
Плотность	$\rho_{п}$	кг/м³	1,67-2
Теплоёмкость	$ср_{п}$	Дж/(кг·К)	1737-1860
Теплопроводность	$\lambda_{п}$	Вт/(м·К)	0,05-0,06

Оптимизация режимных характеристик конденсатора ПБЭУ формулируется как задача многокритериальной нелинейной оптимизации, направленной на одновременное достижение высокой эффективности теплопередачи и минимизации расхода охлаждающей воды. Решение данной задачи требует строгого учета термодинамических и гидродинамических закономерностей, отражающих энергетический и массопереносный баланс в системе.

Для оптимизации режимных параметров конденсатора ПБЭУ, предназначенной для переработки органических и сельскохозяйственных отходов, разработана комплексная математическая модель, учитывающая особенности фазового перехода в парогазовой смеси, гидродинамические ограничения и тепловой баланс системы [9].

Модель основывается на энергетическом уравнении для холодного теплоносителя в спиральном змеевике, уравнении Клаузиуса–Клапейрона для определения условий фазового перехода, среднелогарифмическом температурном напоре в противоточной схеме теплообмена, обобщённом коэффициенте теплопередачи, учитывающем тепловые сопротивления и учёте скрытой теплоты конденсации в парогазовой смеси [10].

С учетом фазового превращения компонентов парогазовой смеси, общее количество передаваемой теплоты включает вклад скрытой теплоты конденсации, сопровождающей переход вещества из паровой в жидкую фазу:

$$Q_{конд} = \sum_{i} \dot{m}_i \cdot r_i \qquad 1)$$

где: $\dot{m}_i$ - массовая скорость конденсации компоненты i; r_i – её удельная теплота фазового перехода.

Фазовый переход парогазовой смеси в жидкую фазу количественно описывается через условие насыщения, определяемое уравнением Клаузиуса–Клапейрона:

$$\ln\left(\frac{p_i}{p_{i0}}\right) = -\frac{\Delta H_i}{R}\left(\frac{1}{T_{п}^{вых}} - \frac{1}{T_{п}^{вх}}\right) \qquad 2)$$

Задача оптимизации формулируется в виде многоцелевой постановки, в рамках которой необходимо одновременно учитывать несколько критериев эффективности. В качестве вектора управляющих переменных рассматривается совокупность параметров:

$$x = \{G_в, T_в^{вх}, G_п, T_п^{вх}\} \quad (3)$$

где $G_в$ — массовый расход охлаждающей воды, $T_в^{вх}$ — её температура на входе, $G_п$ и $T_п^{вх}$ — соответственно массовый расход и температура парогазовой смеси.

На основе этого вектора формулируются целевые функции, характеризующие теплотехническую эффективность системы и ресурсоёмкость процесса:

$$f_1(x) = \varepsilon(x) = \frac{Q(x)}{k(x) \cdot F_з \cdot \Delta T_{ср}(x)} \quad (4)$$

что характеризует эффективность теплопередачи, и

$$f_2(x) = G_в \quad (5)$$

отражающая потребление воды.

Сформулированная задача оптимизации предполагает одновременное стремление к максимизации функции $f_1(x)$, характеризующей эффективность теплообмена, и минимизации функции $f_2(x)$, отражающей ресурсные затраты. С целью упрощения многокритериального анализа и обеспечения взвешенной оценки достигаемого компромисса между этими показателями вводится интегральный функционал:

$$J(x) = \frac{Q(x)}{G_в} \quad (6)$$

Функция $\varepsilon(x)$ характеризует интегральную эффективность процесса теплопередачи, тогда как $J(x)$ описывает удельную тепловую отдачу, приходящуюся на единицу расхода охлаждающей воды. Задача оптимизации заключается в одновременном максимизации указанных целевых показателей при условии минимизации водопотребления, что обеспечивает энерго- и ресурсосберегающий режим функционирования конденсационной системы.

Наложенные ограничения обеспечивают физическую реализуемость процесса и гарантируют достижение полной конденсации парогазовой смеси в установившихся теплогидравлических условиях:

$$T_п^{вых} \le T_{нас} - \Delta T_{недг}$$
$$T_в^{вых} < T_{кип} - \Delta T_{без} \quad (7)$$

где: $T_{нас}$ – температуры насыщения парогазовой смеси; $T_{недг}$ – температура недогрева; термогидравлические рамки $Re \in [1900 \dots 2200]$, $\Delta P_{спир} \le \Delta P_{max}$, а также температурные пределы материалов и отсутствие кипения в спиральном змеевике.

Методологической основой оптимизации режимных параметров конденсатора является многоцелевая байесовская оптимизация, представляющая собой прогрессивный подход к решению задач с высокой вычислительной затратностью и ограниченными экспериментальными возможностями. В отличие от традиционных методов градиентного поиска или полных факторных экспериментов, байесовская оптимизация ориентирована на поиск оптимума при минимальном числе вызовов к целевой функции, что особенно актуально в задачах теплофизического моделирования, требующих значительных вычислительных ресурсов.

Ключевая идея заключается в построении аппроксимирующей модели (суррогата), описывающей поведение целевой функции на основе уже полученных данных (как численных, так и экспериментальных). В качестве такого суррогата, как правило, используется гауссовский процесс, который позволяет не только оценить значение функции,

но и определить уровень неопределенности предсказания в каждой точке параметрического пространства.

На каждой итерации алгоритма выполняется выбор новой точки оценки на основе так называемой функции приобретения — специального критерия, объединяющего знание о текущей аппроксимации функции и её неопределенности. Одним из распространённых критериев является ожидаемое улучшение, которое позволяет сбалансированно учитывать как уже изученные области, так и те, где потенциально может находиться глобальный оптимум.

Этот подход реализуется итеративно: после выбора новой точки производится точный расчёт или экспериментальная оценка целевой функции, далее модель обновляется, уточняя свои предсказания. Такой механизм позволяет эффективно исследовать компромисс между различными целевыми функциями, формируя Парето-оптимальный фронт решений — множество состояний, в которых невозможно улучшить один показатель без ухудшения другого. Таким образом, достигается одновременно максимизация эффективности теплообмена и минимизация расхода охлаждающей воды.

Преимущество метода заключается в том, что он обеспечивает высокую сходимость к оптимуму при минимально необходимом числе итераций, снижая объём как натурных экспериментов, так и ресурсоемких симуляций. Это делает байесовскую оптимизацию особенно ценной в условиях ограниченного экспериментального времени или при высокой стоимости вычислений [11].

Алгоритм байесовской оптимизации режимных параметров КТ ПБЭУ предоставлена на рис.2.

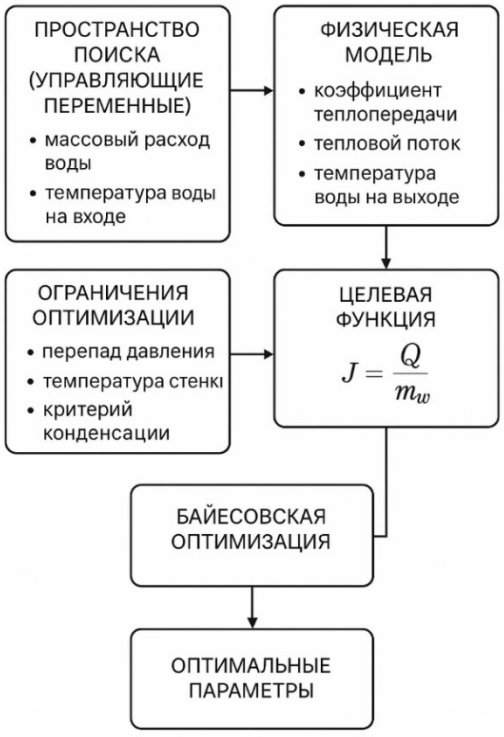


Рисунок 2 - Блок-схема метода байесовской оптимизации.

Программная реализация процесса оптимизации была выполнена на языке Python с использованием библиотеки Scikit-Optimize, предназначенной для реализации вероятностных подходов к глобальной оптимизации. Алгоритм был структурирован в виде последовательного выполнения логически взаимосвязанных этапов, каждый из которых направлен на обеспечение достоверного поиска оптимальных режимных параметров

конденсатора пиролизной установки (рис.3.).

```
!pip install scikit-optimize
import numpy as np
from skopt import gp_minimize
from skopt.space import Real
from skopt.utils import use_named_args
```

Рисунок 3 - Библиотеки для оптимизации

На первом этапе осуществляется определение пространства управляющих переменных, формирующих основу параметрического поиска (рис.4.). В данную совокупность включены: массовый расход охлаждающей воды, температура воды на входе в теплообменник, температура и скорость поступающей парогазовой смеси, что позволяет охватить ключевые термогидравлические характеристики, влияющие на интенсивность теплообмена и полноту конденсации.

```
space = [
    Real(0.01, 0.05,   name="m_w"),       # кг/с
    Real(18.0,  20.0,    name="T_w_in"),    # °C
    Real(0.05,  0.20,    name="v_pgs"),     # м/с
    Real(130.0, 200.0,   name="T_pgs_in")   # °C
F = 0.55                  # м² — площадь теплообмена спирали
delta = 0.003             # м — толщина стенки
lambda_st = 50.0          # Вт/(м·К) — стенка
c_pw = 4180.0             # Дж/(кг·К)
```

Рисунок 4 - Начальные условия

Следующим шагом является формализация физико-математической модели теплообменного процесса в конденсаторе. В рамках данной модели реализованы уравнения теплового баланса, позволяющие рассчитывать интегральный коэффициент теплопередачи (с учётом термических сопротивлений на всех границах фаз), суммарный тепловой поток $Q(x)$, передаваемый от парогазовой среды к охлаждающей воде, температуру выходящей воды, формирующую выходной граничный параметр установки.

Параллельно в модель внедряются физические и конструкционные ограничения, отражающие реальные пределы функционирования системы (рис.5.). К числу таких ограничений относятся максимально допустимый перепад давления на участке теплообменника, температурные пределы стенки змеевика, условие отсутствия кипения в контуре холодного теплоносителя, необходимость полной или частичной конденсации основного компонента парогазовой смеси.

```
Delta_p_w_max = 2.0e5   # Па
Delta_p_pgs_max = 2.0e4 # Па
T_wall_max = 180.0      # °C
def delta_p_w(m_w):     # по модифиц. Дарси-Вейсбах для спирали
    return 1.0e5*(m_w/0.03)
def delta_p_pgs(v_pgs): # TODO
    return 1.0e4*(v_pgs/0.1)
def T_wall_est(k, T_w_in, T_w_out, T_pgs_in, T_pgs_out):
    # оценка температуры стенки
    return 0.5*(T_pgs_in+T_pgs_out) - 0.2*(T_w_in+T_w_out)
```

Рисунок 5 - Граничные условия

В качестве целевой функции используется интегральный критерий эффективности

теплообмена $J(x) = Q(x)/G_в$, который позволяет количественно оценивать, насколько эффективно система использует ресурс воды для теплоотвода, что критически важно в условиях ограниченного водоснабжения или при необходимости повышения общей энергоэффективности установки (рис.6.).

Алгоритм байесовской оптимизации в процессе итерационного поиска строит суррогатную модель (гауссовский процесс) на основе ранее вычисленных значений функции $J(x)$, а затем, при помощи функции приобретения, выбирает новую точку в пространстве параметров, в которой ожидается наибольшее улучшение целевого показателя. Такой подход позволяет адаптивно уточнять модель и с минимальными вычислительными затратами приближаться к глобальному оптимуму (рис.7.).

```
# Запуск байесовской оптимизации
res = gp_minimize(
    func=objective,
    dimensions=space,
    n_calls=30,
    n_initial_points=10,
    acq_func="EI",
    random_state=42
```

Рисунок 6 - Запуск Байесовской оптимизации

```
# Извлечение оптимального результата
opt_m_w = res.x[0]
opt_T_w_in_C = res.x[1]
opt_T_w_in_K = opt_T_w_in_C + 273.15
opt_Phi = -res.fun
opt_res = solve_point(opt_m_w, opt_T_w_in_K)
```

Рисунок 7 - Извлечение оптимального результата

Результаты и обсуждение. В результате многократного обновления модели и пересчета критерия полезности формируется набор оптимальных режимных параметров, при которых достигается максимальная интенсивность теплопередачи при минимальном расходе охлаждающей воды. Полученные значения могут быть использованы для настройки реальных установок и служат базой для дальнейшей экспериментальной валидации.

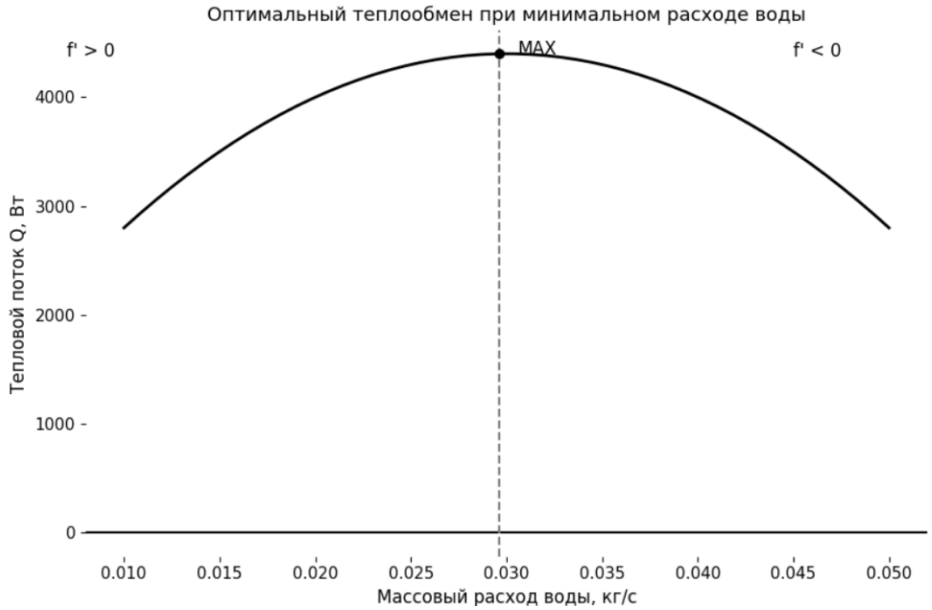


Рисунок 8 - Оптимальный теплообмен при минимальном расходе охлаждающей воды.

Анализ зависимости теплового потока от массового расхода охлаждающей воды (см. рис. 8.) показал наличие характерной параболической формы кривой, что свидетельствует о существовании выраженного экстремума — оптимального режима функционирования теплообменного аппарата. В диапазоне малых значений расхода (до ≈ 0,03 кг/с) наблюдается поступательный рост теплового потока, обусловленный увеличением температурного градиента между парогазовой смесью и охлаждающей водой, а также ростом коэффициента теплопередачи вследствие улучшения условий теплообмена.

Однако по мере достижения критического значения расхода охлаждающей воды ($G_в \approx$ 0,03 кг/с), дальнейшее увеличение расхода не приводит к дальнейшему росту эффективности теплообмена. Это объясняется тем, что увеличение скорости потока сокращает время контакта охлаждающей среды со стенкой змеевика, что, в свою очередь, снижает величину среднелогарифмического температурного напора. Таким образом, прирост тепловой мощности становится нивелированным, а в ряде случаев — снижается вследствие неполной реализации температурного потенциала теплоносителя.

Оптимальным с энергетической точки зрения режимом был признан режим с массовым расходом охлаждающей воды порядка $G_в$ = 0,03 кг/с, при котором достигается максимальное значение теплового потока $Q(x) \approx$ 4389 Вт. Этот результат указывает на точку технологического равновесия, в которой достигается наибольшая эффективность теплообмена при минимально необходимом расходе ресурса, то есть при оптимальном соотношении между тепловой производительностью системы и затратами охлаждающей воды.

Полученные результаты подтверждают адекватность предложенной физико-математической модели и высокую применимость метода многоцелевой байесовской оптимизации в задачах настройки режимных параметров теплообменных систем. Совокупность экспериментальных и расчетных данных позволяет утверждать, что предложенный алгоритм обеспечивает поиск эффективных компромиссных решений с учётом многопараметрических ограничений, минимизируя при этом количество необходимых итераций.

Выводы. На основе разработанной физико-математической модели теплообмена в конденсаторе пиролизной установки установлено, что эффективность процесса конденсации продуктов пиролиза критически зависит от сочетания температурных, гидродинамических и фазовых параметров, включая массовый расход охлаждающей воды, начальную температуру теплоносителя и тепловую нагрузку от парогазовой смеси.

Реализация алгоритма многоцелевой байесовской оптимизации в программной среде Python с использованием библиотеки *scikit-optimize* позволила эффективно сформировать Парето-оптимальный фронт решений. Это дало возможность определить наиболее рациональные режимы работы теплообменного аппарата, обеспечивающие максимальный тепловой поток при минимальном расходе охлаждающей воды.

Результаты численного эксперимента показали наличие выраженного оптимума: при массовом расходе охлаждающей воды $G_в \approx$ 0,03 кг/с достигается максимальный тепловой поток $Q(x) \approx$ 4389 Вт. Дальнейшее увеличение расхода не приводит к росту эффективности из-за снижения времени теплового контакта и уменьшения температурного напора.

Полученные данные подтверждают применимость многоцелевой байесовской оптимизации в задачах энергетической настройки теплообменного оборудования. Метод обеспечивает высокую точность определения эффективных режимов при минимальном

числе расчетных итераций, что особенно актуально в контексте автоматизированного проектирования энергоэффективных пиролизных установок.

Практическая реализация найденных оптимальных параметров может способствовать повышению ресурсо- и энергоэффективности в маломасштабных установках переработки биомассы, включая агропромышленный сектор, а также расширению инструментов цифрового моделирования в задачах проектирования теплотехнических систем.

Список использованных источников:

1. Solar, J., Acha, E., Arias, P. L., López-Urionabarrenechea, A., & Caballero, B. M. (2021). Pyrolysis of Forestry Waste in a Screw Reactor with Four Sequential Heating Zones: Influence of Isothermal and Nonisothermal Profiles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *60*(51), 18627–18639. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01932.
2. Астафьев А.В. (2021). Обоснование условий реализации автотермического пиролиза органической биомассы. Томский политехнический университет. https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/65219/1/dis00422.pdf.
3. Uzakov G. et al. Modeling of heat exchange processes in a condenser of a pyrolysis bioenergy plant //BIO Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 71. – С. 02021.
4. Wang, M., Jia, T., Song, X., Chen, D., Yin, L., & Qian, K. (2024). CFD–DEM Simulation of Heat Transfer and Reaction Characteristics of Pyrolysis Process of MSW Heated by High-Temperature Flue Gas. *Processes*, *12*(2), 390. https://doi.org/10.3390/pr12020390.
5. Ertugrul, I., Ozel, S., Ozer, S., & Ulkir, O. (2022). Analysis of thermal barrier coated pistons in the COMSOL and the effects of their use with water + ethanol doped biodiesel. *Thermal Science*, *26*(4 Part A), 2981–2989. https://doi.org/10.2298/tsci2204981e.
6. Li, R. et al. (2022). Experimental optimization of condensation temperature in pilot-scale pyrolysis plant. *Chemical Engineering Journal*, 435, 134951.
7. Блинов А.А., Павлов Д.С. Влияние параметров конденсатора на выход жидкой фазы. *Вестник ТПУ*, 2018.
8. Huo, S., Yuan, Z., Zhu, F., Shu, Q., Zhou, W., Feng, P., Zhu, L., Wang, Z., Qin, L., Dong, R., & Zhu, S. (2018). Biomass Accumulation of Chlorella Zofingiensis G1 Cultures Grown Outdoors in Photobioreactors. *Frontiers in Energy Research*, *6*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00049
9. Uzakov G., Mamatkulova S., Ergashev S. Thermal mode of the condenser of a pyrolysis bioenergy plant with recuperation of secondary thermal energy //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 411. – С. 01021.
10. Guichet, V., Delpech, B., Khordehgah, N., & Jouhara, H. (2022). Experimental and theoretical investigation of the influence of heat transfer rate on the thermal performance of a multi-channel flat heat pipe. *Energy*, *250*, 123804. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123804.
11. Blanchard, A. B., Noack, B. R., Cornejo Maceda, G. Y., Sapsis, T. P., Li, Y., Zhou, Y., & Fan, D. (2021). Bayesian optimization for active flow control. *Acta Mechanica Sinica*, *37*(12), 1786–1798. https://doi.org/10.1007/s10409-021-01149-0.

Г.Н. Узаков, профессор кафедры «Энергетический инжиниринг», Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан, e-mail: uzoqov66@mail.ru , https://orcid.org/0009-0005-7386-8075

С.Г. Маматкулова, докторант кафедры «Энергетический инжиниринг», Каршинский

государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан, e-mail: urisheva80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0987-5298

OPTIMIZATION OF THE OPERATING PARAMETERS OF THE CONDENSER OF A PYROLYSIS BIOENERGY PLANT FOR THE PROCESSING OF AGRICULTURAL WASTE

G.N. Uzakov[1], S.G. Mamatkulova[2]

[1,2]Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. This paper presents a study aimed at optimizing the operating parameters of the condenser of a pyrolysis bioenergy plant designed for thermal processing of biomass. Given the importance of effective condensation of the vapor-gas mixture coming from the reactor of the unit, special attention is paid to modeling heat transfer in a spiral coil taking into account the phase transition. A physical and mathematical model based on the energy balance, the Clausius–Clapeyron equation and the logarithmic temperature head in the countercurrent scheme has been developed. Multi-purpose Bayesian optimization is used as a solution method, which makes it possible to find a compromise between the maximum heat flux and the minimum cooling water flow. As a result of the numerical experiment, the optimal value of the mass flow rate of cooling water (≈0.03 kg/s) was determined, at which the maximum heat flux (≈4389 W) is achieved. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach and substantiate its applicability in the tasks of improving the energy efficiency of small-scale pyrolysis bioenergy plants. The presented methodological and calculation solutions can be used in engineering practice in the design of heat engineering equipment for the processing of agricultural and wood biomass.

Keywords: pyrolysis; heat transfer; Bayesian optimization; spiral coil; condenser-heat exchanger; mathematical modeling; heat flow, mass flow of water.

G.N. Uzakov, Professor, Department of Energy Engineering, e-mail: uzoqov66@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-7386-8075
S.G. Mamatkulova, Doctoral Candidate, Department of Energy Engineering, e-mail: urisheva80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0987-5298
Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

УДК 621.224.4; 620.91

РАЗРАБОТКА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СВОБОДНОПОТОЧНЫХ ВОДОТОКОВ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ И ПЛАВУЧЕГО ОСНОВАНИЯ

Г.Н.Узаков[1], Р.А. Мамедов[2]

[1]Каршинский государственный технический университет
[2] Бухарский государственный технический университет

Аннотация. *В статье рассматривается разработка гидроэнергетической установки с плавучим основанием и двумя кинетическими гидротурбинами, предназначенной для работы в условиях свободнопоточных низконапорных водотоков. Проведён анализ существующих патентно-технических решений и выявлены основные недостатки традиционных конструкций. Предложена модернизированная система направляющих поверхностей, обеспечивающая увеличение скорости потока и повышение эффективности гидротурбин. На основе разработанных чертежей получены геометрические зависимости и аналитические выражения, позволяющие определить ключевые параметры установки на этапе проектного проектирования. Представленные результаты подтверждают перспективность разработки и могут служить основой для дальнейших экспериментальных исследований.*

Ключевые слова: *кинетическая гидротурбина, свободнопоточный водоток, плавучее основание, направляющая конструкция, магнитоэлектрический генератор, гибридные энергоустановки, микрогидроэлектростанции, Аму-Бухарский канал.*

Введение. В мире на сегодняшний день наблюдается стремительный рост спроса на электроэнергию, сопровождающийся усиливающейся энергетической нестабильностью и усугубляющимся климатическим кризисом. На этом фоне всё большее внимание уделяется разработке гидроэнергетических установок, основанных на использовании возобновляемых источников энергии и способных обеспечивать устойчивую генерацию электроэнергии без вредных выбросов. Увеличение концентрации CO_2 в атмосфере и продолжающийся рост глобальных температур стимулируют научное сообщество и промышленный сектор к поиску более эффективных и экологически безопасных способов получения энергии. Согласно данным IEA, выбросы CO_2 в энергетическом секторе в 2023 году увеличились на 1,1 % и достигли рекордного уровня - 37,4 млрд тонн, несмотря на рост доли ВИЭ в мировом производстве электроэнергии [1]. На рисунке 1 приведена динамика выбросов парниковых газов CO_2 и роста доли возобновляемых источников энергии в период 2020-2023 годов.

Эти данные подчёркивают необходимость активного перехода к новым типам энергетических технологий, ориентированных на чистую выработку электроэнергии, в том числе к перспективным решениям на основе энергии свободнопоточных водотоков. Одним из перспективных направлений повышения эффективности малых гидроэнергетических систем является применение установок с кинетическими гидротурбинами на плавучем основании, позволяющих извлекать энергию течения без напора и при минимальном воздействии на окружающую среду.

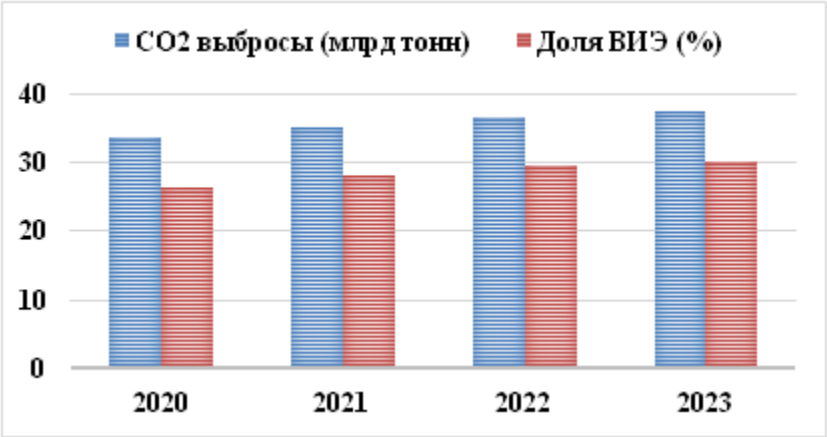


Рисунок 1 - Динамика выбросов CO_2 и роста доли ВИЭ в 2020-2023 годах

На фоне перечисленных глобальных вызовов доля возобновляемых источников энергии в структуре мировой выработки электроэнергии превысила 30 % в 2023 году, при этом основное увеличение обеспечили солнечные и ветровые электростанции [2,3]. Гидроэнергетика при этом продолжает играть ключевую роль в формировании устойчивого энергетического баланса, а правительства и инвесторы в США, Китае, странах ЕС и других регионах активно поддерживают проекты, направленные на расширение использования гидроресурсов и модернизацию малых гидроэнергетических систем [4].

В условиях растущего спроса на экологически чистую электроэнергию особое значение приобретает развитие современных гидроэнергетических установок, способных эффективно работать в условиях малых рек и свободнопоточных каналов, обеспечивая локальную генерацию при минимальном воздействии на окружающую среду.

На рисунке 2 представлена круговая диаграмма, отражающая распределение выработки электроэнергии из возобновляемых источников в 2023 году. Согласно данным диаграммы, крупнейший вклад в производство «зелёной» электроэнергии внесли солнечные (38 %) и ветровые (34 %) электростанции. Существенную долю сохранила и гидроэнергетика (24 %), тогда как совокупная доля прочих источников (геотермальная энергия, биомасса и др.) составила около 4 %. Эти данные отражают глобальные тенденции развития ВИЭ и подчёркивают актуальность дальнейшего совершенствования гидроэнергетических технологий.



Рисунок 2 - Доля различных видов ВИЭ в мировой выработке электроэнергии (2023 г.)

В условиях растущего мирового спроса на электроэнергию и обострения экологических

ограничений особое внимание уделяется развитию технологий, обеспечивающих устойчивую генерацию без создания напора и крупных гидротехнических сооружений. За последние годы заметно увеличилась интенсивность исследований, направленных на совершенствование малых и сверхмалых гидроэнергетических систем, работающих в естественных и искусственных свободнопоточных каналах [5-7]. Подобные установки привлекают интерес благодаря способности функционировать в условиях низкого напора, отсутствию необходимости строительства плотин, а также минимальному воздействию на гидроэкосистемы. Значительное количество зарубежных работ посвящено оптимизации кинетических гидротурбин, повышению их коэффициента использования энергии потока, а также разработке конструкций, обеспечивающих устойчивость и эффективность в переменных гидрологических условиях [8]. Наряду с этим растёт интерес к применению плавучих опорных платформ, позволяющих стабилизировать положение оборудования, адаптироваться к изменению уровня воды и снижать затраты на монтаж и обслуживание [9,10].

Вместе с тем возможности дальнейшего строительства крупномасштабных гидроэлектростанций ограничены дефицитом подходящих площадок и ужесточением экологических требований, что усиливает актуальность малой гидроэнергетики, интегрируемой в существующие ирригационные системы. Особое значение в этом контексте имеет Аму-Бухарский район, в котором функционирует Аму-Бухарский машинный канал (АБМК) - ответвление реки Амударья, начинающееся у гидроузла «Двойник» (39.219845, 63.719540). Канал включает разветвлённую сеть магистральных и межхозяйственных водоканалов, обеспечивающих водоснабжение Бухарской и части Навоийской областей. Для внедрения малых гидроэнергетических установок требуется анализ расхода, скорости течения, перепадов уровней и режима работы гидротехнических сооружений. Ранее исследователями Бухарского инженерно-технологического института была выполнена первичная оценка гидроэнергетического потенциала каналов региона на основе схемы линейного расположения водоканалов, предоставленной управлением АБМК, и спутниковых данных Google Earth Pro [11-12]. На основе этих данных была построена схема (рис. 3), позволяющая идентифицировать участки с наибольшим энергетическим потенциалом.

Научные исследования показывают, что сочетание конструкции с кинетической гидротурбиной с плавучим основанием является одним из наиболее перспективных направлений развития малой гидроэнергетики, особенно в регионах с развитой сетью ирригационных каналов и устойчивыми свободнопоточными водотоками [13-15]. Такой подход обеспечивает эффективное преобразование кинетической энергии потока в электрическую без создания напора, без строительства плотин и без вмешательства в гидравлический режим водных объектов, что делает технологию экологически нейтральной и масштабируемой. В связи с этим актуальной задачей становится системное изучение конструктивных особенностей, параметров работы и энергетической эффективности гидроэнергетических установок данного типа. Настоящее исследование направлено на анализ современных научных подходов, технических решений и методов проектирования малых гидроэнергетических установок с кинетической турбиной и плавучим основанием, работающих в условиях свободного потока, что формирует основу для дальнейших экспериментальных и инженерных разработок.

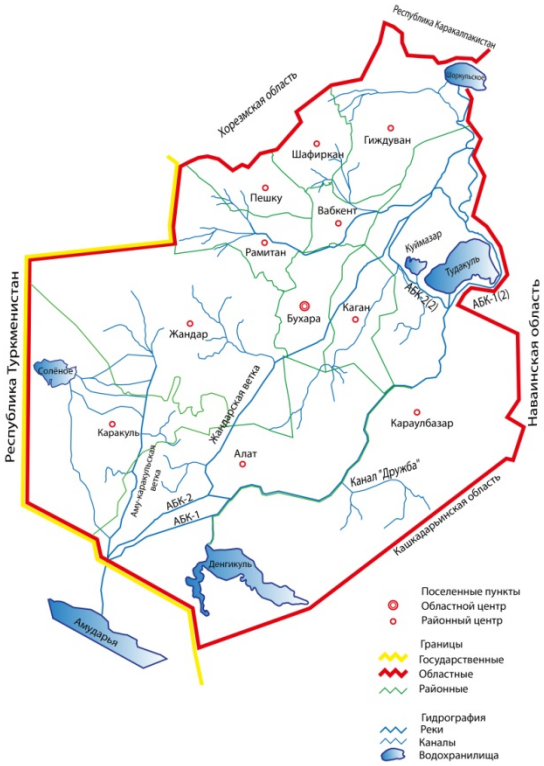


Рисунок 3 - Структурная схема размещения ключевых магистральных и межхозяйственных каналов в пределах Бухарской области

Проанализируем научно-технические разработки, представленные патентных исследованиях, посвящённых созданию и эксплуатации гидроэнергетических установок с кинетическими гидротурбинами, размещёнными на плавучем основании. Подобные решения представляют особый интерес для свободнопоточных водотоков, где устойчивость конструкции, эффективность улавливания кинетической энергии и надёжность механических узлов определяют работоспособность и экономическую целесообразность таких систем.

В патенте [CN207500037U] на рисунке 4 рассмотрена конструкция гидроэнергетической установки с кинетической гидротурбиной типа водяного колеса, включающая два последовательно расположенных водяных колеса с горизонтальной осью вращения, установленных на плавучем основании с понтонами и соединённых опорной рамой. Валы обоих колёс смонтированы на подшипниках свободного вращения и связаны с редукторами, передающими вращение на электрогенераторы, что обеспечивает двухступенчатое использование энергии водного потока. Анализ показывает, что такая схема позволяет увеличить съём кинетической энергии, однако наличие ограничительного блока и усиливающих рёбер, применяемых для регулирования лопастей, усложняет конструкцию и обслуживание. Кроме того, применение двух редукторно-генераторных комплектов повышает себестоимость и приводит к дополнительным механическим потерям, что снижает общий КПД установки, ограничивая её эффективность по сравнению с более простыми гидротурбинными решениями [16].

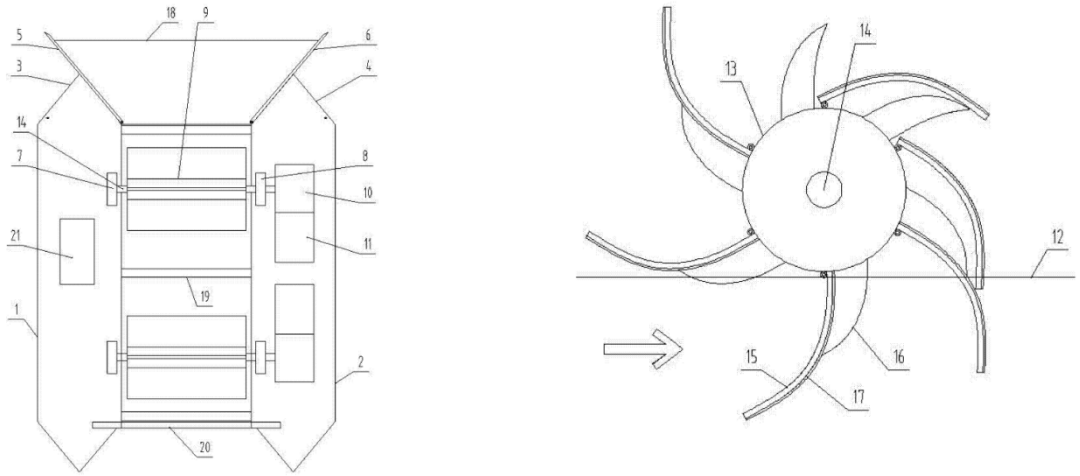


Рисунок 4 - Общий вид гидроэнергетической установки по патенту KR20110035228A

В патенте [KR20110035228A] на рисунке 5 представлена гидроэнергетическая установка с кинетической гидротурбиной типа Дарье, включающая геликоидную турбину с горизонтальным валом, установленную на металлической раме и опирающуюся на подшипники свободного вращения. Рама закреплена на двух поплавках, выполняющих функцию плавучего основания, которое фиксируется на месте с помощью металлического троса, соединённого с якорем на дне водотока. Механическая энергия вращения передаётся через вал на электрогенератор, обеспечивая выработку электроэнергии. Однако анализ показывает, что конструкция характеризуется рядом существенных недостатков: возникновение значительных центробежных сил на валу приводит к ускоренному износу узлов, снижению надёжности и повышенным требованиям к обслуживанию; к тому же система демонстрирует низкий КПД и отличается повышенной конструктивной сложностью, что ограничивает её практическую эффективность и долговечность [17].

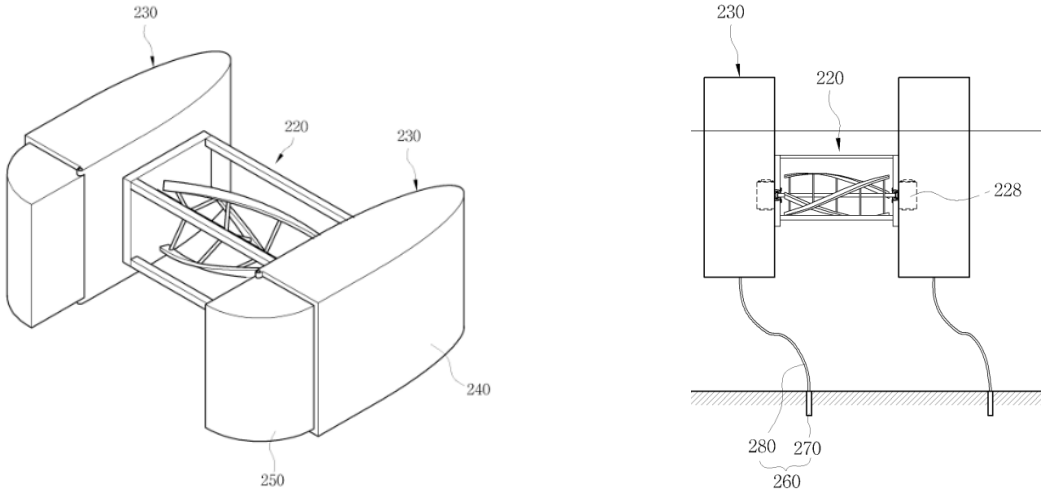


Рисунок 5 - Конструкция гидротурбинной установки согласно патенту KR20110035228A

В патенте [WO2016030910A1] на рисунке 6 рассмотрена конструкция гидроэнергетической установки, включающая три последовательно расположенные кинетические гидротурбины конической формы, размещённые в водном канале, образованном плавучим основанием. Лопасти каждой турбины имеют изогнутую, винтовую

геометрию: их узкие заострённые концы обращены к потоку, а широкие концы фиксированы к барабану, установленному на валу турбины. Для обеспечения свободного вращения турбины опираются на подшипники, смонтированные на поплавках, соединённых металлической рамой в единую плавучую платформу. Передача вращения на электрогенератор осуществляется посредством цепной передачи, а сама установка фиксируется на месте канатами, закреплёнными на берегу. Анализ показывает, что такая конструкция обладает рядом существенных недостатков: использование цепной передачи вызывает повышенный шум, требует постоянного контроля и регулярной смазки, без чего происходит ускоренный износ звёздочек и цепи; последовательное размещение трёх турбин без направляющих каналов снижает скорость потока для второй и третьей турбины, что уменьшает общую эффективность и повышает себестоимость; кроме того, электрогенератор демонстрирует низкие выходные энергетические показатели в условиях свободнопоточных водотоков, что ограничивает практическую эффективность данной установки [18].

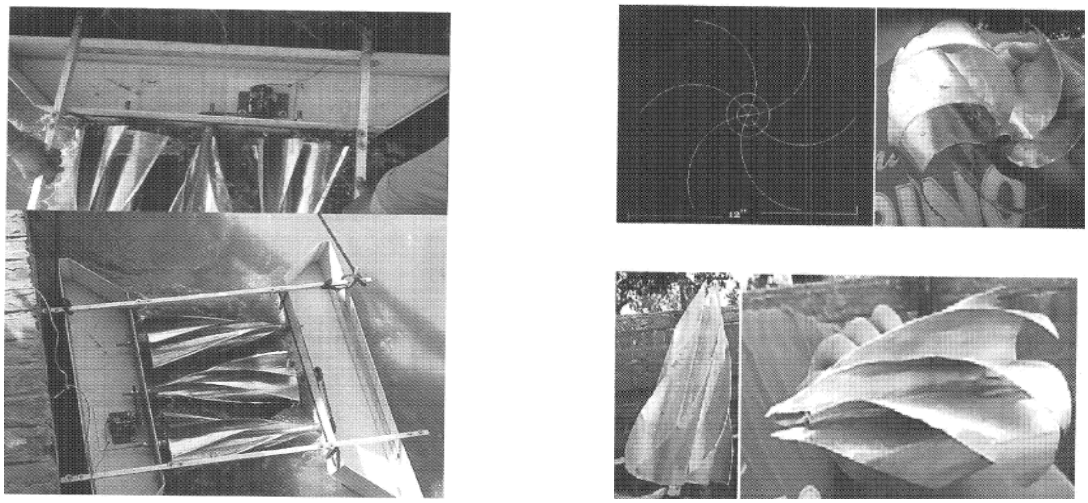


Рисунок 6 - Иллюстрация конструкции, описанной в патенте WO2016030910A1

Несмотря на положительные результаты рассмотренных патентных разработок, исследования в области создания эффективных гидроэнергетических установок с кинетическими гидротурбинами на плавучем основании остаются недостаточно завершёнными. Недостаточно изучены решения, направленные на снижение гидродинамических потерь и повышение устойчивости работы турбин в условиях свободнопоточного водотока, где скорость течения невелика и подвержена сезонным колебаниям. Особого внимания требуют конструкции, в которых используются тихоходные многополюсные магнитоэлектрические генераторы с аксиальными постоянными магнитами и возможностью встречного вращения якоря и индуктора, что потенциально повышает производительность установки при малых скоростях потока. Кроме того, остаются нерешёнными вопросы оптимизации плавучей платформы - в частности, выбора геометрии поплавков-трапеций с округлыми боковыми поверхностями, влияющих на устойчивость и снижение колебаний конструкции. Недостаточно исследованы и направляющие системы: работа решётки, а также внешней и внутренней комбинированной направляющей, обеспечивающей равномерное распределение потока по лопастям турбины. Помимо этого, в существующих патентах практически отсутствуют разработки, предусматривающие интеграцию дополнительных источников генерации, например фотоэлектрических модулей, что могло бы увеличить суммарную энергоотдачу установки в условиях изменчивых природных факторов.

Цель исследования - разработка и научное обоснование конструкции гидроэнергетической установки с плавучим основанием и кинетической гидротурбиной для свободнопоточных водотоков, основанной на анализе зарубежных технических решений и оценке гидроэнергетического потенциала ирригационной системы Аму-Бухарского канала.

Принцип работы и конструктивные особенности гидроэнергетической установки. Гидроэнергетическая установка (1), представленная на рисунке 7 функционирует за счёт рационального использования кинетической энергии свободнопоточного водотока и конструкции плавучего основания (2), состоящего из поплавков (3), которые компенсируют колебания уровня воды и одновременно способствуют локальному увеличению скорости потока. В передней части основания установлена защитная решётка (5), предотвращающая попадание мусора и твёрдых частиц в рабочую зону. Далее поток направляется к внешней направляющей конструкции (6) с изогнутыми и сужающимися к выходу поверхностями, что ускоряет движение воды и обеспечивает перпендикулярное воздействие на лопасти (13) кинетической гидротурбины (7), повышая её эффективность. После прохождения первой турбины поток распределяется по внутренним направляющим поверхностям (9), которые имеют аналогичную аэрогидродинамическую форму, дополнительно увеличивают скорость воды и обеспечивают оптимальное взаимодействие с лопастями второй кинетической гидротурбины (8). Обе турбины вращаются в одном направлении - против часовой стрелки, передавая механическую энергию на системы ремённой передачи. Турбина (7) приводит в движение большой шкив (28), который через перекрёстную ремённую передачу (29) увеличивает скорость вращения маленького шкива (26) и передаёт движение валу (20), соединённому с якорем (18) тихоходного магнитоэлектрического генератора (17). Вторая турбина (8) через большой шкив (30) и открытую ремённую передачу (31) приводит в движение маленький шкив (27), передающий энергию валу (21), связанному с индуктором (19) того же генератора. В ходе совместного вращения якоря (18) и индуктора (19) в трёхфазных обмотках (44,45) возникает переменный ток, индуцируемый постоянными магнитами (42,43). Сформированная электроэнергия поступает через кабель (35) и контактные кольца (32) в систему управления (37), куда также поступает постоянный ток от солнечной панели (33) через кабель (36). Оба источника - переменный ток от генератора и постоянный ток от солнечной панели - объединяются в гибридном контроллере (38), на выходе которого формируется стабилизированный постоянный ток, аккумулируемый батареей (39). Электроэнергия, накопленная в аккумуляторе, далее направляется к инвертору (40), преобразующему её в переменный ток для питания потребителей (41).

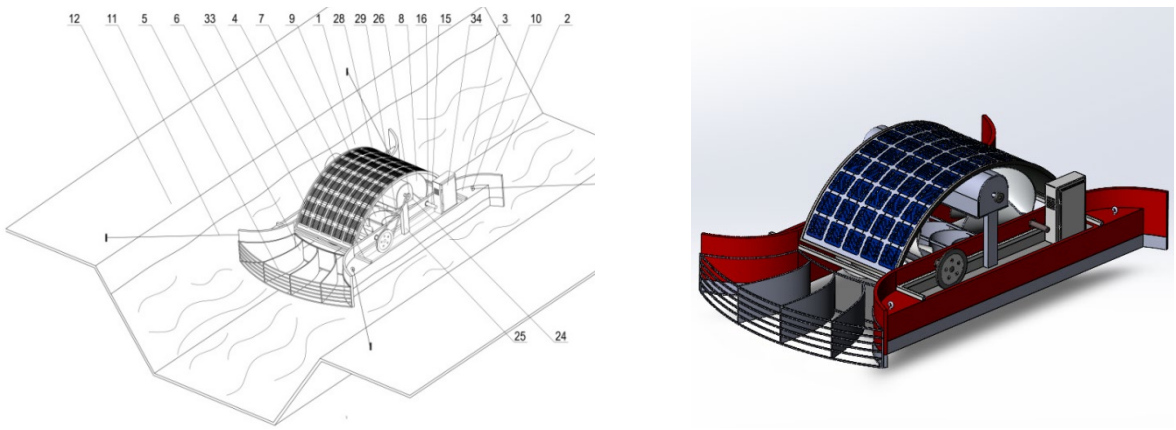


Рисунок 7 - Общий вид гидроэнергетической установки

Для обоснования работоспособности предложенной гидроэнергетической установки с плавучим основанием на рисунках 8 и 9 представлены вид сверху на плавучее основание и схема геометрических размеров направляющих поверхностей внешней направляющей конструкции соответственно. На основе разработанных чертежей определены ключевые радиусы кривизны, основные параметры ускорения потока и коэффициенты использования энергии свободнопоточного водного потока. Полученные графические материалы и аналитические выражения подтверждают корректность выбранных конструктивных решений, показывают их согласованность с предполагаемыми гидродинамическими условиями и демонстрируют высокий потенциал установки для эффективной работы в низконапорных свободнопоточных водотоках.

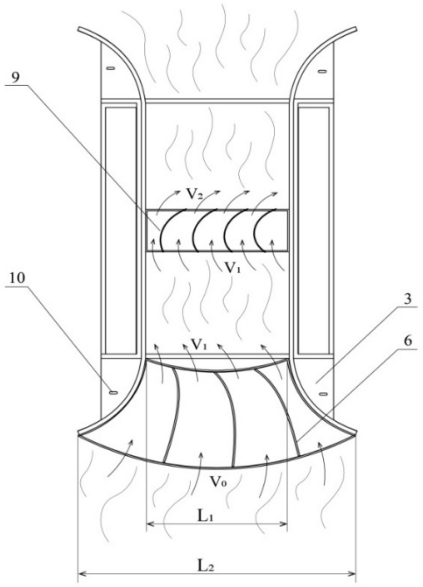


Рисунок 8 - Вид сверху на плавучее основание

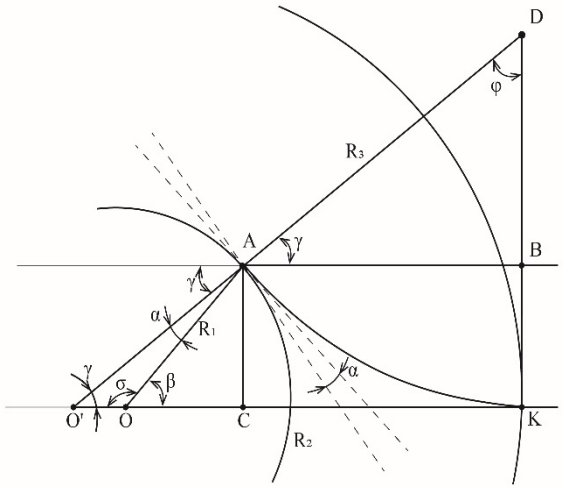


Рисунок 9 - Схема геометрических размеров направляющих поверхностей

Определим параметры эффективности предлагаемой гидроэнергетической установки. Аналитические выражения для определения оптимальных размеров радиуса R_3 направляющих поверхностей внешней направляющей конструкции, приведенной на рисунке 9 имеют следующий вид:

$$R_2 = OC + CK \quad (1)$$

$$CK = AB \quad (2)$$

$$cos\beta = \frac{OC}{R_1} \quad (3)$$

Из свойств треугольника ΔO′AO определим следующие выражения:

$$\alpha + \gamma + \sigma = 180°$$

$$\sigma = 180° - \beta$$

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (4)$$

$$\varphi = 90° - (\beta - \alpha) \quad (5)$$

$$sin\varphi = \frac{AB}{R_3} \quad (6)$$

$$R_2 = OC + R_3 \cdot sin\varphi \quad (7)$$

$$R_2 = R_1 \cdot cos\beta + R_3 \cdot sin\varphi \quad (8)$$

$$R_3 = \frac{R_2 - R_1 \cdot cos\beta}{sin\varphi} = \frac{R_2 - R_1 \cdot cos\beta}{\sin(90° - (\beta - \alpha))} \quad (9)$$

где: R_1 = OA - внутренний радиус внешней направляющей конструкции; R_2 = O′K - внешний радиус внешней направляющей конструкции; R_3 = AD - радиус внешней направляющей поверхности внешней направляющей конструкции.

Скорость потока воды, проходящая через внешнюю направляющую конструкцию гидроэнергетической установки, приведенной на рисунке 8 определяется через уравнение непрерывности:

$$S_0 \cdot V_0 = S_1 \cdot V_1 \quad (10)$$

$$L_0 \cdot H \cdot V_0 = L_1 \cdot H \cdot V_1 \quad (11)$$

$$V_1 = \frac{L_0 \cdot V_0}{L_1} \quad (12)$$

Коэффициент использования энергии потока воды микрогидроэлектростанции с двумя кинетическими гидротурбинами определяется из следующего выражения:

$$C_P = C_{P1} + C_{P2} \quad (13)$$

Для первой гидротурбины:

$$C_{P1} = \frac{P_1}{0{,}5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3} = \frac{T_1 \cdot \omega_1}{0{,}5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3} \quad (14)$$

Для второй гидротурбины:

$$C_{P2} = \frac{P_2}{0{,}5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_2^3} = \frac{T_2 \cdot \omega_2}{0{,}5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_2^3} \quad (15)$$

где: P_1, P_2 - мощности первой и второй кинетических гидротурбин; ρ - плотность воды; S - площадь кинетической гидротурбины взаимодействующей с потоком воды; V_1 - скорость потока воды, взаимодействующей с первой кинетической гидротурбиной; V_2 - скорость потока воды, взаимодействующей со второй кинетической гидротурбиной; T_1, T_2 - момент первой и второй гидротурбин; ω_1, ω_2 - угловая скорость первой и второй гидротурбин.

Представленные аналитические зависимости подтверждают возможность оптимизации направляющих поверхностей, повышения скорости потока в рабочей зоне и увеличения коэффициента использования энергии за счёт комбинированной работы двух кинетических гидротурбин. Полученные выражения демонстрируют внутреннюю согласованность конструкции и позволяют определить основные параметры установки на этапе проектного моделирования, что создаёт основу для дальнейших опытных исследований и изготовления экспериментального образца.

Заключение. В работе предложена конструкция гидроэнергетической установки с плавучим основанием и двумя кинетическими гидротурбинами, ориентированная на эксплуатацию в условиях низконапорных свободнопоточных водотоков. Выполненный анализ патентных и технических решений позволил выявить ключевые нерешённые задачи и сформировать усовершенствованную компоновку, включающую внешние и внутренние направляющие поверхности, повышающие скорость потока и эффективность турбин. Разработаны геометрические соотношения и аналитические выражения, необходимые для оптимизации конструкции на этапе проектирования. Представленные результаты подтверждают перспективность предлагаемой установки и создают основу для дальнейших экспериментальных испытаний, моделирования рабочих процессов и оценки интеграции с гибридными возобновляемыми источниками энергии.

Список использованных источников:

1. IEA. CO_2 Emissions in 2023. International Energy Agency, March 2024.
2. Ember. Global Electricity Review 2024: Renewables hit 30% of global electricity. April

2024.

3. Ember. Wind and Solar reach a record 12% of global electricity in 2022. April 2023.

4. IRENA. Renewables 2022: Statistics and Highlights. July 2022.

5. Shahsavari A. et al. A comprehensive review of small-scale hydrokinetic energy systems for sustainable electricity generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, pp. 145-162.

6. Martin C. et al. Performance assessment of hydrokinetic turbines in shallow free-flowing channels. Energy Conversion and Management, 2022, pp. 1120-1135.

7. Hu J., Wang T. Development trends of free-flow hydropower technologies in irrigation networks. Journal of Cleaner Production, 2024, pp. 1-15.

8. Alam M.M. et al. Design optimization of horizontal-axis hydrokinetic turbines for low-velocity flows. Renewable Energy, 2023, pp. 980-995.

9. Li X., Zhou Y. Floating platforms for riverine hydrokinetic systems: stability, vibration and performance analysis. Ocean Engineering, 2024, pp. 210-225.

10. Pier Paolo Brancaleoni et al. Hybrid solar and hydrogen energy system 0-D model for off-grid sustainable power system: A case in Italy. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, pp. 1108-1120.

11. Р.А. Мамедов, “Расчеты ресурсов валового гидроэнергетического потенциала Аму-Бухарского канала одноточечным и двухточечным методами”, Международная научно-техническая конференция: «Тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения» - Ташкент, 05.2021, стр. 202-209

12. Sadullayev N.N., Safarov A.B., Mamedov R.A., Kodirov D. Assessment of wind and hydropower potential of Bukhara region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 614, 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/614/1/012036.

13. Ibrahim W., Mohamed M., Ismail R., Leung P., Xing W., Shah A. *Hydrokinetic energy harnessing technologies: a review*. - *Energy Reports*, 2021, Vol. 7, pp. 2021-2042.

14. Anyi M., Kirke B. *Evaluation of Small Axial Flow Hydrokinetic Turbines for Remote Communities*. - *Energy for Sustainable Development*, 2010, Vol. 14, No. 2, pp. 110-116.

15. Jeongbin Park, Bradford G. Knight, Yingqian Liao и др. *CFD-based Design Optimization of Ducted Hydrokinetic Turbines*. - preprint, 2023.

16. CN207500037U

17. KR20110035229A

18. WO2016030910A1

Bibliography:

1. IEA. CO_2 Emissions in 2023. International Energy Agency, March 2024.

2. Ember. Global Electricity Review 2024: Renewables hit 30% of global electricity. April 2024.

3. Ember. Wind and Solar reach a record 12% of global electricity in 2022. April 2023.

4. IRENA. Renewables 2022: Statistics and Highlights. July 2022.

5. Shahsavari A. et al. A comprehensive review of small-scale hydrokinetic energy systems for sustainable electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, pp. 145-162.

6. Martin C. et al. Performance assessment of hydrokinetic turbines in shallow free-flowing channels. *Energy Conversion and Management*, 2022, pp. 1120-1135.

7. Hu J., Wang T. Development trends of free-flow hydropower technologies in irrigation networks. *Journal of Cleaner Production*, 2024, pp. 1-15.
8. Alam M.M. et al. Design optimization of horizontal-axis hydrokinetic turbines for low-velocity flows. *Renewable Energy*, 2023, pp. 980-995.
9. Li X., Zhou Y. Floating platforms for riverine hydrokinetic systems: stability, vibration and performance analysis. *Ocean Engineering*, 2024, pp. 210-225.
10. Pier Paolo Brancaleoni et al. Hybrid solar and hydrogen energy system 0-D model for off-grid sustainable power system: A case in Italy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, pp. 1108-1120.
11. Mamedov R.A. "Calculation of gross hydropower potential of the Amu-Bukhara canal using single-point and two-point methods." *International Scientific and Technical Conference: Trends in the Development of Alternative and Renewable Energy: Problems and Solutions*, Tashkent, May 2021, pp. 202-209.
12. Sadullayev N.N., Safarov A.B., Mamedov R.A., Kodirov D. Assessment of wind and hydropower potential of Bukhara region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 614, 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/614/1/012036.
13. Ibrahim W., Mohamed M., Ismail R., Leung P., Xing W., Shah A. Hydrokinetic energy harnessing technologies: a review. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7, pp. 2021-2042.
14. Anyi M., Kirke B. Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 2010, Vol. 14, No. 2, pp. 110-116.
15. Jeongbin Park, Bradford G. Knight, Yingqian Liao et al. CFD-based Design Optimization of Ducted Hydrokinetic Turbines. *Preprint*, 2023.
16. CN207500037U
17. KR20110035229A
18. WO2016030910A1

Мамедов Расул Акиф-оглы, доктор философии по техническим наукам, доцент, Бухарский государственный технический университет, тел: +998 93 960 93 39, e-mail: rasul_91-92@mail.ru
Узаков Гулом Норбоевич, доктор технических наук, профессор, Каршинский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF A HYDROENERGY UNIT FOR FREE-FLOWING WATERCOURSES BASED ON A KINETIC TURBINE AND A FLOATING PLATFORM

G.N. Uzakov[1], R.A. Mamedov[2]

[1]Karshi State Technical University
[2]Bukhara State Technical University

Abstract. This paper presents the development of a hydroenergy unit featuring a floating platform and two kinetic hydro turbines designed for operation in free-flowing, low-head watercourses. An analysis of existing patent-based and technical solutions was carried out,

revealing key shortcomings of conventional designs. An improved system of guiding surfaces is proposed, enabling an increase in flow velocity and enhancing turbine efficiency. Based on the developed technical drawings, geometric relationships and analytical expressions were obtained, allowing the determination of essential design parameters at the early stage of engineering development. The presented results confirm the potential of the proposed system and can serve as a foundation for further experimental studies.

Keywords: kinetic hydroturbine, free-flow watercourse, floating platform, guiding structure, magnetoelectric generator, hybrid energy systems, micro-hydropower plants, Amu-Bukhara Canal.

Mamedov Rasul Akif-ogli, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Bukhara State Technical University, tel: +998 93 960 93 39, e-mail: rasul_91-92@mail.ru
Uzakov Gulom Norboevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Karshi State Technical University

УДК 621.311.25

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Н.А. Стушкина, Е.А. Татаринцева, А.В. Браганец

ФГБОУ ВО Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)

Аннотация. *Расширение сегмента распределённой энергетики и активное внедрение учебных лабораторий, работающих на возобновляемых источниках, заметно усилили требования к устойчивости локальных энергокомплексов [1]. Солнечные установки характеризуются значительной переменчивостью выработки, что создаёт чувствительные колебания мощности, особенно в небольших лабораторных системах с ограничёнными резервами [17]. В гибридных контурах, сочетающих фотоэлектрические модули, аккумуляторы и сетевой ввод, точность краткосрочного прогноза играет ключевую роль: она определяет стратегию зарядки, распределение нагрузки и общую энергетическую эффективность [5]. Более точные оценки будущей генерации позволяют уменьшить пики потребления, сократить количество ненужных переключений элементов системы и поддерживать стабильные режимы работы учебных комплексов [18].*

Для достижения цели сформулированы задачи:

1. представить современные подходы к прогнозированию солнечной генерации и обозначить условия их применения в инженерных энергетических системах;

2. описать архитектуру гибридной лабораторной энергосистемы и выделить особенности её работы;

3. оценить, как точность прогнозов отражается на управлении гибридной системой и какие меры позволяют повысить её эффективность.

Объектом рассмотрения выступает гибридная схема электроснабжения, а предметом — алгоритмы прогнозирования фотоэлектрической генерации, влияющие на режимы управления [3]. Материал ориентирован на выявление того, каким образом корректная оценка будущей мощности повышает устойчивость и функциональную гибкость локальных энергокомплексов.

Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, гибридная система электроснабжения, фотоэлектрическая генерация, алгоритмы прогнозирования, машинное обучение, аккумуляторный контур, сетевой контур.*

Введение. Развитие локальных энергосистем на базе солнечных панелей привёл к активному внедрению математических моделей, способных предсказывать уровень солнечной генерации на ближайший период [2]. Такой прогноз особенно важен для гибридных комплексов, где солнечные панели работают совместно с аккумуляторными модулями, сетевым вводом или дизельными установками [12]. Чтобы обеспечить устойчивые режимы и уменьшить нагрузку на оборудование, необходимо заранее понимать, как будет меняться выходная мощность. Предварительная оценка колебаний мощности позволяет поддерживать устойчивые режимы, снижать избыточную нагрузку на оборудование и предотвращать нерациональные переключения между источниками [4]. Ошибки

прогнозирования могут приводить к перерасходу аккумуляторных ресурсов, нежелательным переключениям между источниками, влиянию на качество электроэнергии [15] и увеличению эксплуатационных издержек [22]. По этой причине в инженерной практике рассматривается целый спектр алгоритмов, каждый из которых обладает своими преимуществами.

Одним из наиболее распространённых подходов остаётся использование статистических моделей. Значимую часть практических решений составляют статистические методы. Наиболее известными представителями этого направления являются методы на основе авторегрессии и скользящего среднего [5]. Их преимущество заключается в том, что такая модель легко адаптируется под особенности конкретного объекта и не требует больших вычислительных ресурсов [10]. Поскольку солнечная генерация обладает выраженной сезонностью и суточными колебаниями, статистические методы позволяют уловить такие закономерности и преобразовать их в прогноз мощности [17]. Однако чувствительность к резким изменениям погодных условий снижает точность в периоды облачности, дождя или переходных состояний атмосферы. Для небольших учебных лабораторий такие ошибки становятся заметными, поскольку резервировать мощность в локальной системе сложнее, чем в промышленном комплексе.

Отдельное направление составляют методы машинного обучения, основанные на больших массивах данных о солнечной радиации, температуре, влажности, скорости ветра и других климатических параметрах [22]. В инженерной сфере наибольшую популярность получили градиентный бустинг, методы опорных векторов и ансамблевые модели, сочетающие несколько подходов [8]. Эти модели эффективны в условиях нестабильных погодных процессов, поскольку способны анализировать нелинейные зависимости и находить сложные корреляции между факторами. При достаточном наборе исторических данных точность таких алгоритмов заметно выше, чем у традиционных статистических [23]. Это особенно ценно для гибридных систем, где требуется прогнозировать не только средние значения, но и краткосрочные пики, которые влияют на режимы зарядки аккумуляторов и включение резервных контуров. Несмотря на высокий потенциал, внедрение таких моделей требует корректной подготовки данных, стабильных каналов получения метеоинформации и регулярного обновления параметров.

В последние годы особое внимание привлекают нейросетевые алгоритмы, которые демонстрируют высокий уровень адаптивности к изменяющимся условиям. Нейросетевые подходы — рекуррентные архитектуры и модели LSTM — активно применяются в последние годы [19]. В инженерных установках часто применяются рекуррентные сети, модели на основе длинной краткосрочной памяти и сверточно-рекуррентные комбинации. Их преимущество заключается в умении анализировать временные ряды с учётом предшествующих состояний, что позволяет предсказывать динамику солнечной генерации даже в условиях крупных выбросов или нестабильности атмосферного фронта [3]. В локальных лабораторных комплексах такие технологии могут обеспечивать точные краткосрочные прогнозы, которые особенно важны для управления режимами работы оборудования. В то же время подобные модели обладают высокой вычислительной нагрузкой, что может создавать ограничение при использовании в малых системах автоматизации.

Существует также направление, связанное с гибридными моделями прогнозирования. Отдельный интерес вызывают гибридные схемы, объединяющие статистические методы, машинное обучение и физические модели солнечной радиации [2]. В них сочетаются

статистические методы, алгоритмы машинного обучения и физические модели солнечной радиации. Такой подход позволяет учитывать положение Солнца, характеристики фотоэлектрических модулей, углы наклона и ориентацию панелей. Физические компоненты обеспечивают базовый уровень точности, даже когда исторические данные представлены неполно, а статистическая составляющая помогает адаптировать модель под конкретные условия. Эти решения позволяют повысить устойчивость прогноза при неполных данных и нерегулярных погодных колебаниях [17]. В результате удаётся повысить достоверность прогнозов при небольших временных горизонтах, что особенно важно для гибридных систем, где планирование режимов выполняется в пределах минут или часов.

Помимо выбора алгоритма, важную роль играет качество исходной информации. Гибридные системы, работающие в лабораторных помещениях, часто располагают ограниченным набором датчиков, что усложняет использование сложных методов. Если система оборудована только датчиками освещённости и температуры модулей, алгоритму приходится компенсировать нехватку данных за счёт дополнительных механизмов обучения или внешних источников метеоинформации. Для повышения точности рекомендуется комплексное использование локальных датчиков и данных региональных метеостанций, что позволяет сгладить кратковременные выбросы и уточнить прогноз в периоды нестабильной погоды.

С практической точки зрения при выборе алгоритма прогнозирования учитываются сразу несколько факторов: требуемый горизонт прогнозирования, вычислительные возможности лабораторной системы, необходимый уровень точности, количество доступных данных и характер нагрузки. В простых системах бывает достаточно статистических моделей, которые дают стабильный результат при минимальных затратах. В более сложных лабораторных комплексах, где нагрузка меняется в зависимости от учебного процесса и количества работающего оборудования, предпочтение отдаётся алгоритмам машинного обучения или нейросетевым подходам. В результате удаётся добиться более точного распределения энергии, что снижает использование сетевого ввода и повышает автономность комплекса.

Обзор основных методов прогнозирования показывает, что каждый алгоритм обладает конкретной областью применения и уровнем эффективности. Статистические модели подходят для стабильной погоды и короткого горизонта, модели машинного обучения — для переменной облачности, а нейросети — для сложных и нелинейных ситуаций. В совокупности это создаёт широкие возможности для адаптации гибридных систем учебных лабораторий под реальные условия эксплуатации. Выбор подходящей модели позволяет обеспечить оптимальный режим работы энергетического оборудования, снизить издержки и повысить устойчивость системы в течение всего рабочего дня лаборатории.

Цель исследования - определить, какие алгоритмы прогнозирования солнечной генерации обеспечивают наиболее устойчивое функционирование гибридной системы электроснабжения лабораторного типа.

Материалы и методы исследования. Гибридные системы электроснабжения, используемые в учебных лабораториях, формируются таким образом, чтобы обеспечить устойчивое питание оборудования при значительных колебаниях нагрузки. Лабораторный комплекс характеризуется выраженной сменой профиля потребления: интенсивность работы оборудования зависит от расписания занятий, характера проводимых экспериментов и числа одновременно задействованных рабочих мест. Это создаёт режим постоянной изменчивости, который требует высокой адаптивности системы [6; 20]. Совмещение нескольких

источников энергии позволяет сглаживать пики потребления и поддерживать стабильность, а взаимодействие между элементами обеспечивается управляющей электроникой.

Солнечная генерация выступает базовым источником в дневное время, снижая сетевое потребление и разгружая инфраструктуру. Фотоэлектрические модули ориентируются с учётом инсоляции, геометрии крыши и доступной площади. Производительность таких модулей зависит от угла установки, температуры элементов и погодной динамики [1; 2; 14]. По этой причине солнечный контур рассматривается как переменный источник, требующий поддержки со стороны аккумуляторных блоков. Несмотря на скромные мощности, характерные для учебных объектов, вклад солнечной генерации существенно уменьшает пиковые сетевые нагрузки и стабилизирует работу системы.

Аккумуляторный контур служит для накопления избыточной энергии и её последующей отдачи в периоды повышенного потребления [15]. В учебных лабораториях преимущественно применяются литий-ионные модули, отличающиеся высокой плотностью энергии и длительным ресурсом. Аккумуляторы компенсируют кратковременные скачки нагрузки, возникающие при включении лабораторных установок, и поддерживают систему в периоды недостаточной солнечной генерации [12]. Приоритеты распределения энергии задаются управляющим алгоритмом: сначала используется солнечный ресурс, затем задействуются аккумуляторы, и лишь при дефиците подключается сетевой ввод [13]. Такая последовательность снижает расход электроэнергии и уменьшает нагрузку на сетевую инфраструктуру.

Сетевой контур выполняет резервную функцию и обеспечивает питание при слабой солнечной активности, низком уровне заряда аккумуляторов или в случае отключения отдельных компонентов. Для лабораторий он остаётся страховым механизмом, предотвращающим перебои электроснабжения. Совместная работа автономных и сетевых источников требует точной настройки режимов, что обеспечивается инверторами, контроллерами заряда и системой мониторинга [6; 11]. Эти элементы поддерживают корректное переключение между контурами, контролируют частоту и напряжение и формируют оперативную картину энергетических потоков.

Структурная схема гибридной системы варьируется в зависимости от конфигурации оборудования, однако её ключевые элементы неизменны. В обобщённом виде их состав и функции представлены в таблице.

Таблица 1 - Основные компоненты гибридной системы электроснабжения учебных лабораторий

Компонент системы	**Основное назначение**	**Особенности эксплуатации**
Солнечные панели	Генерация энергии в дневное время	Зависимость от погоды и ориентации
Аккумуляторные модули	Накопление и выдача энергии	Чувствительность к режимам заряда/разряда
Инверторное оборудование	Преобразование энергии и распределение потоков	Требует точной настройки и мониторинга
Контроллеры заряда	Управление зарядом аккумуляторов	Важны алгоритмы предотвращения перегрузок
Сетевой ввод	Резервное питание	Используется при дефиците автономных источников
Система мониторинга	Контроль режимов работы	Обеспечивает сбор и передачу параметров

Приведённая структура показывает, как распределяются функции между основными элементами и какие ограничения необходимо учитывать при управлении. Наличие нескольких источников требует точной координации: контроллеры и инверторы регулируют энергетические потоки, обеспечивают переключение между контурами и удерживают параметры напряжения и частоты в допустимых диапазонах. Это особенно важно в учебных лабораториях, где значительная часть приборов чувствительна к колебаниям питания.

Архитектура системы адаптирована к особенностям учебного процесса. Пики нагрузки возникают эпизодически: в одних занятиях задействовано множество установок, в других — лишь несколько стендов. По этой причине оперативные данные от датчиков о состоянии солнечной генерации, уровне заряда аккумуляторов и текущем потреблении позволяют своевременно корректировать режимы работы. Такой подход снижает нагрузку на аккумуляторные модули и увеличивает их ресурс.

Надёжность и безопасность также являются ключевыми факторами. В лабораториях используется оборудование, требующее бесперебойного питания, а кратковременные отключения могут привести к сбоям или повреждению аппаратуры. Поэтому гибридная архитектура дополняется защитными механизмами: автоматами, предохранителями, аварийными блоками и средствами диагностики. Они предотвращают перегрев элементов, корректируют потоки энергии и обеспечивают безопасную работу в изменчивых условиях.

В результате сочетание солнечных панелей, аккумуляторных модулей, сетевого ввода и управляющей электроники формирует гибкую структуру, способную адаптироваться к режимам учебных лабораторий. Такая архитектура поддерживает стабильное электропитание, снижает расходы и создаёт основу для применения интеллектуальных алгоритмов прогнозирования. Наличие чёткой структуры упрощает согласование модели прогноза с фактическими механизмами управления, обеспечивая повышение эффективности и уменьшение нагрузки на систему.

Результаты и обсуждение. Качество управления гибридной системой электроснабжения учебных лабораторий во многом определяется точностью прогноза солнечной генерации. От достоверности этих данных зависит устойчивость режимов работы, поскольку малейшее отклонение быстро отражается на небольшом масштабе лабораторного комплекса [17]. При переменной облачности и непредсказуемой динамике нагрузки ошибки предсказания приводят к неоптимальным решениям: возрастают частота переключений между источниками и нагрузка на аккумуляторные модули, что ускоряет их износ [22]. Уточнение влияния точности прогнозов позволяет увидеть, как параметры используемой модели формируют последующие режимы работы и стабильность системы.

Гибридная архитектура опирается на прогноз солнечной мощности при планировании будущего распределения потоков энергии. Если ожидаемая генерация оказывается завышенной, система преждевременно сокращает сетевой ввод или откладывает заряд аккумуляторов, что создаёт дефицит энергии при снижении инсоляции. На практике это проявляется в резком увеличении потребления из сети либо ускоренном разряде батарей. Заниженный прогноз, наоборот, заставляет систему чаще прибегать к аккумуляторам или сетевому источнику, снижая долю дешёвой солнечной энергии и увеличивая нагрузку на аккумуляторные блоки [6]. В результате растут эксплуатационные затраты и уменьшается общая эффективность [7]. Для лабораторных комплексов, работающих в периоды интенсивных учебных занятий, подобные колебания особенно ощутимы.

Поскольку доступная резервная мощность в лабораториях ограничена, анализ влияния точности прогнозов приобретает прикладное значение. Обычно оцениваются: относительная

ошибка предсказания, глубина разряда аккумуляторов, число переключений инверторов, объём сетевого потребления и степень использования солнечной энергии. Для сопоставления характеристик разных методов нередко применяют табличные сводки, позволяющие увидеть, как алгоритмы прогнозирования меняют распределение ресурсов внутри системы.

Перед аналитическим разбором приведена таблица, отражающая усреднённые показатели при трёх подходах: статистической модели, алгоритмах машинного обучения и нейросетевой архитектуре.

Таблица 2 - Сравнение показателей работы гибридной системы при различных алгоритмах прогнозирования

Тип алгоритма	Средняя ошибка прогноза (MAE), %	Использование солнечной энергии, %	Доля сетевого ввода, %	Средняя глубина разряда аккумуляторов, %
Статистическая модель	18	52	38	64
Машинное обучение	11	63	27	58
Нейросетевая модель	7	71	20	49

Представленные значения позволяют количественно оценить, как повышение точности прогноза влияет на работу гибридной системы. Сравнение трёх подходов демонстрирует отчётливое преимущество нейросетевых методов, обеспечивающих минимальную среднюю ошибку и наиболее полное использование солнечной энергии [19; 3]. При работе нейросетевой модели нагрузка на сеть уменьшается, глубина разряда аккумуляторов снижается, а распределение энергии становится более рациональным. На основе сводных данных (таблица 2) видно: уменьшение ошибки предсказания стабилизирует режим работы, сокращает глубину разряда и снижает объем сетевой подпитки [12]. Для учебных лабораторий это выражается в меньшем числе циклов «заряд–разряд», увеличенном сроке службы батарей и более устойчивом электропитании при переменной нагрузке. Высокая точность прогноза способствует оптимальной работе оборудования и помогает избегать нежелательных перегрузок [24; 16].

Расчёт влияния ошибки прогноза на энергопотоки гибридной системы: для наглядности представлен упрощённый пример работы гибридной системы в течение учебного дня (6 часов активной нагрузки) с последующими расчётами энергопотоков и ошибкой прогноза.

Исходные данные (упрощённая модель):

— установленная мощность PV-модуля (пиковая) не используется напрямую, прогноз и фактические значения заданы покадрово;

— период анализа: 6 часов (по одному часу каждое наблюдение);

— профиль нагрузки (постоянный в течение периода): 2,5 кВт → за 6 часов суммарная потребность = 2,5 × 6 = 15,0 кВт·ч;

— начальное состояние батареи: ёмкость полезная 8,0 кВт·ч (из 10 кВт·ч), начальный SOC = 50% → начальная доступная энергия = 8,0 × 0,5 = 4,0 кВт·ч;

— управляющая логика (упрощённо): сначала используется энергия PV, затем аккумулятор до исчерпания доступной энергии, далее подключается сеть; цель — показать влияние ошибки прогноза на долю сетевого ввода.

Часы наблюдения (1-часовые интервалы). Даны два набора прогноза и один набор фактических измерений.

Фактическая (измеренная) мощность PV по часам, кВт:

A_actual = [0.4, 1.2, 2.8, 3.5, 2.0, 0.8]

Прогноз (вариант 1 — более оптимистичный / более ошибочный), кВт:

P_pred1 = [0.5, 1.5, 3.0, 4.0, 2.5, 1.0]

Прогноз (вариант 2 — более точный), кВт:

P_pred2 = [0.45, 1.3, 2.9, 3.6, 2.1, 0.9]

Шаг 1 — вычисление суммарной энергии PV (кВт·ч) и средней мощности

Сумма фактической генерации (A_actual):

0.4 + 1.2 = 1.6

1.6 + 2.8 = 4.4

4.4 + 3.5 = 7.9

7.9 + 2.0 = 9.9

9.9 + 0.8 = 10.7 кВт·ч (итого фактическая энергия за 6 ч)

Сумма прогноза 1 (P_pred1):

0.5 + 1.5 = 2.0

2.0 + 3.0 = 5.0

5.0 + 4.0 = 9.0

9.0 + 2.5 = 11.5

11.5 + 1.0 = 12.5 кВт·ч (итого прогноз 1)

Сумма прогноза 2 (P_pred2):

0.45 + 1.3 = 1.75

1.75 + 2.9 = 4.65

4.65 + 3.6 = 8.25

8.25 + 2.1 = 10.35

10.35 + 0.9 = 11.25 кВт·ч (итого прогноз 2)

Шаг 2 — расчёт ошибки прогноза (MAE) и MAE в процентах (по отношению к средней фактической мощности)

Абсолютные ошибки по часам для P_pred1:

|0.5 − 0.4| = 0.1

|1.5 − 1.2| = 0.3

|3.0 − 2.8| = 0.2

|4.0 − 3.5| = 0.5

|2.5 − 2.0| = 0.5

|1.0 − 0.8| = 0.2

Сумма абсолютных ошибок = 0.1 + 0.3 + 0.2 + 0.5 + 0.5 + 0.2 = 1.8 кВт

MAE (P_pred1) = (сумма абсолютных ошибок) / N = 1.8 / 6 = 0.3 кВт

Средняя фактическая мощность = (сумма фактических значений) / 6 = 10.7 / 6 = 1.783333... кВт

MAE% (P_pred1) = 0.3 / 1.783333... = 0.168151... → 16.82% (округл. до 16.8%)

Абсолютные ошибки по часам для P_pred2:

|0.45 − 0.4| = 0.05

|1.3 − 1.2| = 0.10

|2.9 − 2.8| = 0.10

|3.6 − 3.5| = 0.10

|2.1 − 2.0| = 0.10

|0.9 − 0.8| = 0.10

Сумма абсолютных ошибок = 0.05 + 0.10 + 0.10 + 0.10 + 0.10 + 0.10 = 0.55 кВт

MAE (P_pred2) = 0.55 / 6 = 0.091666... кВт

MAE% (P_pred2) = 0.091666... / 1.783333... = 0.051395... → 5.14% (округл. до 5.1%)

Комментарий: в примере прогноз 2 показывает существенно меньшую MAE% (≈5.1%) по сравнению с прогнозом 1 (≈16.8%), что иллюстрирует эффект улучшения качества модели.

Шаг 3 — модель управления и влияние на сетевой ввод (упрощённый учёт очередности: PV → аккумулятор → сеть)

Всего нагрузки за период = 15,0 кВт·ч.

Сценарий A — система действует согласно прогнозу 1 (P_pred1 = 12.5 кВт·ч)

Ожидаемая генерация 12.5 кВт·ч. Приоритет: сначала PV покрывает нагрузку. Ожидаемый дефицит = 15.0 − 12.5 = 2.5 кВт·ч. Ожидается, что этот дефицит покроет аккумулятор: начальная доступная энергия в батарее = 4.0 кВт·ч → после предполагаемого использования батареи остаётся 4.0 − 2.5 = 1.5 кВт·ч (ожидаемый SOC).

Фактическая генерация оказалась 10.7 кВт·ч → фактический дефицит = 15.0 − 10.7 = 4.3 кВт·ч. При реальном потреблении аккумулятор отдаёт оставшиеся 1.5 кВт·ч → остаток, который приходится брать из сети = 4.3 − 1.5 = 2.8 кВт·ч.

Итого сетевой ввод (Сценарий A) = 2.8 кВт·ч.

Сценарий B — система действует согласно прогнозу 2 (P_pred2 = 11.25 кВт·ч)

Ожидаемая генерация 11.25 кВт·ч. Ожидаемый дефицит = 15.0 − 11.25 = 3.75 кВт·ч. Батарея отдает 3.75 кВт·ч при доступных 4.0 → остаётся 4.0 − 3.75 = 0.25 кВт·ч.

Фактический дефицит = 4.3 кВт·ч (как и ранее). Батарея может фактически отдать 0.25 кВт·ч → сетевой ввод = 4.3 − 0.25 = 4.05 кВт·ч.

Итого сетевой ввод (Сценарий B) = 4.05 кВт·ч.

Интерпретация результатов: в данном упрощённом управляющем сценарии более оптимистичный прогноз (P_pred1), хоть и более ошибочный по MAE%, в конкретной конфигурации привёл к меньшему сетевому вводу (2.8 кВт·ч), чем более «точный» прогноз P_pred2 (4.05 кВт·ч). Это подчёркивает важную мысль: не только абсолютная ошибка прогноза имеет значение, но и то, как именно отклонение проявляется относительно профиля нагрузки и текущего SOC батареи — управляющая логика определяет итоговый эффект.

Шаг 4 — перевод на экономику (примерная оценка экономии)

Для примера принята цена электроэнергии из сети 0,15 €/кВт·ч.

Разница в сетевом вводе между сценарием B и A = 4.05 − 2.8 = 1.25 кВт·ч.

Экономия в пользу сценария A = 1.25 × 0.15 = 0.1875 € за рассматриваемый период (6 часов).

На основе вычислений можно понять, что при прочих равных условиях улучшение MAE% обычно даёт преимущество, но локальные эффекты (начальный SOC батареи, момент отклонения прогноза — переоценка или недооценка в ключевые часы) могут изменить направление эффекта. Это подчёркивает необходимость проектирования адаптивных стратегий управления, учитывающих характер ошибок прогноза, профиль нагрузки и целевые приоритеты (минимизация затрат, продление ресурса батареи, максимально «чистое» использование PV и т. п.).

При использовании статистических моделей система часто повышает долю сетевого ввода, поскольку подобные методы плохо реагируют на резкие погодные изменения. В часы пиковой нагрузки это приводит к избыточному потреблению из сети и росту затрат. Неправильное предсказание также вызывает несвоевременные циклы заряда и разряда, что

ускоряет старение аккумуляторных модулей и повышает расходы на обслуживание, особенно в условиях их ежедневной эксплуатации.

Применение алгоритмов машинного обучения улучшает точность прогнозов за счёт учета нелинейных зависимостей. Доля сетевого потребления сокращается, а режимы работы становятся стабильнее. Тем не менее даже такие модели утрачивают точность при резких скачках инсоляции, поэтому периодическая корректировка параметров с учётом сезона, текущих условий и состояния оборудования остаётся необходимой. В учебных лабораториях такие алгоритмы нередко обеспечивают приемлемый баланс между вычислительной сложностью и качеством предсказания.

Наиболее устойчивые результаты демонстрируют нейросетевые подходы, способные обрабатывать большие объёмы данных и учитывать временные закономерности. Прогноз, сформированный нейросетью, позволяет системе заранее адаптировать режим работы инверторов и аккумуляторов, сокращая число переключений и снижая нагрузку на силовую электронику. Для лабораторного оборудования, активно используемого в течение дня, подобная предсказуемость становится критически важной. При ожидании высокой генерации аккумуляторы удерживаются в оптимальном диапазоне заряда, а при прогнозируемом снижении заранее компенсируется возможный дефицит.

Точность предсказания особенно заметна при оценке глубины разряда аккумуляторов. Чем надёжнее прогноз, тем реже возникают глубокие циклы, снижающие ресурс батарей. Для лабораторных условий, где аккумуляторы работают ежедневно и в нерегулярных режимах, снижение глубины разряда до уровня 50–55% становится важным фактором долговечности. Статистические модели, напротив, нередко приводят к разряду выше 60%, что заметно уменьшает срок службы батарейных блоков.

С точки зрения устойчивости энергосистемы точный прогноз позволяет применять адаптивные алгоритмы управления. В этом режиме аккумуляторы перестают выполнять роль основного буфера и используются для сглаживания краткосрочных колебаний. Это уменьшает количество полных циклов заряда и разряда и обеспечивает более стабильные параметры напряжения и частоты, что особенно важно при работе чувствительной лабораторной аппаратуры.

Прогноз также служит основой для выбора оптимальных режимов работы инверторов и зарядных контроллеров. Алгоритм, опирающийся на точные данные, регулирует параметры преобразования в зависимости от ожидаемого уровня солнечной генерации: снижает нагрузку на инвертор при слабой инсоляции или перераспределяет заряд между аккумуляторными блоками при её повышении. Это повышает КПД системы и уменьшает тепловые потери.

Заключение. В совокупности изложенные факторы подтверждают: высокая точность прогнозирования солнечной генерации является ключевым условием эффективного управления гибридной системой учебных лабораторий. Достоверный прогноз обеспечивает рациональное распределение потоков энергии, продлевает срок службы оборудования, снижает эксплуатационные затраты и способствует стабильному электропитанию в периоды интенсивной учебной нагрузки. Сравнение по данным таблицы 2 наглядно показывает, что переход к нейросетевым моделям приносит наибольший вклад в рост эффективности и формирует основу для дальнейшего развития интеллектуальных систем управления.

Анализ подтверждает ключевую роль точного прогнозирования солнечной генерации в обеспечении эффективной работы гибридных лабораторных энергосистем [3]. Снижение погрешности прогноза увеличивает долю солнечной энергии в энергобалансе, уменьшает

нагрузку на аккумуляторные модули и способствует более стабильному функционированию локального энергетического комплекса [25].

Список использованных источников:

1. Баев, И. В. Возобновляемые источники энергии: принципы работы и применение. — М.: Энергопресс, 2020. — 312 с.
2. Бондарев, П. Н. Солнечная энергетика: основы проектирования и эксплуатации. — СПб.: ПрофЭнерго, 2019. — 284 с.
3. Голубев, А. А. Гибридные энергосистемы: теория и практика. — М.: Техносфера, 2021. — 348 с.
4. Гущин, В. С. Фотоэлектрические установки: конструкция и моделирование. — Новосибирск: СибАкадемПресс, 2018. — 256 с.
5. Данилов, В. П. Методы прогнозирования в энергетике. — М.: ЭнергоАналитика, 2017. — 298 с.
6. Жарков, К. Ю. Электроснабжение малых объектов: современные решения. — М.: Альянс, 2022. — 220 с.
7. Лаптев, С. Г. Энергетические системы с распределённой генерацией. — СПб.: Политехника, 2020. — 334 с.
8. Марков, Н. С. Интеллектуальные методы управления энергетическими системами. — Казань: Университетская книга, 2021. — 310 с.
9. Орехов, А. П. Автономные фотоэлектрические комплексы: проектирование и эксплуатация. — Екатеринбург: УралЭнерго, 2018. — 240 с.
10. Романов, Е. И. Математические модели в энергетике. — М.: Наука, 2019. — 280 с.
11. Селиванов, В. Г. Инверторные системы и силовая электроника. — М.: ТехЭнерго, 2020. — 292 с.
12. Трофимов, Р. В. Аккумуляторные системы в автономной энергетике. — СПб.: ЭнергоМир, 2019. — 268 с.
13. Шевченко, А. Н. Управление энергобалансом в гибридных установках. — М.: ЭнергоСистемы, 2021. — 305 с.
14. Патент № 2801633 C1 Российская Федерация, МПК F24S 30/45. Устройство слежения приемной панели за Солнцем : № 2022134103 : заявл. 23.12.2022 : опубл. 11.08.2023 / О. В. Лештаев, В. И. Загинайлов, Н. А. Стушкина [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – EDN HBHPAX.
15. Лештаев, О. В. Анализ показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения с сетевыми солнечными электростанциями малой мощности / О. В. Лештаев, Н. А. Стушкина, В. И. Загинайлов // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 5. – С. 48-53. – DOI 10.34286/1995-4646-2021-80-5-48-53. – EDN ZMGGEV.
16. Карлаков, Д. С. Влияние величины зарядного напряжения на сокращение ёмкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей / Д. С. Карлаков, Н. А. Стушкина // Агротехника и энергообеспечение. – 2022. – № 2(35). – С. 25-29. – EDN WHJRHL.
17. Балабанов, Н. С. Прогнозирование солнечной радиации: современные тенденции // Энергетический портал. — 2022. — URL: https://energy-portal.example (дата обращения: 26.11.2025).
18. Гриднев, П. А. Точность алгоритмов прогнозирования для распределённой

генерации // SolarTech Online. — 2021. — URL: https://solartech.example (дата обращения: 26.11.2025).

19. Использование нейросетей в прогнозировании солнечной генерации // EnergyAI. — 2023. — URL: https://energyai.example (дата обращения: 26.11.2025).

20. Интеллектуальное управление гибридными системами электроснабжения // PowerSystems Hub. — 2020. — URL: https://powersystems.example (дата обращения: 26.11.2025).

21. Лабораторные энергосистемы: особенности эксплуатации // EngineeringLab. — 2022. — URL: https://englab.example (дата обращения: 26.11.2025).

22. Машинное обучение в прогнозировании энергетических потоков // ML Energy Review. — 2024. — URL: https://mlenergy.example (дата обращения: 26.11.2025).

23. Методы оценки эффективности гибридных энергоустановок // EnergyMetrics. — 2021. — URL: https://energymetrics.example (дата обращения: 26.11.2025).

24. Применение аккумуляторных систем в распределённой энергетике // BatteryWorld. — 2020. — URL: https://batteryworld.example (дата обращения: 26.11.2025).

25. Современные решения в микрогенерации для учебных объектов // MicroGrid Info. — 2023. — URL: https://microgridinfo.example (дата обращения: 26.11.2025).

Bibliography

1. Baev, I. V. Renewable Energy Sources: Operating Principles and Applications. Moscow: Energopress, 2020. 312 p.

2. Bondarev, P. N. Solar Energy: Design and Operation Fundamentals. St. Petersburg: ProfEnergo, 2019. 284 p.

3. Golubev, A. A. Hybrid Energy Systems: Theory and Practice. Moscow: Tekhnosfera, 2021. 348 p.

4. Gushchin, V.S. Photovoltaic Installations: Design and Modeling. Novosibirsk: SibAkademPress, 2018. 256 p.

5. Danilov, V.P. Forecasting Methods in the Energy Sector. Moscow: EnergoAnalitika, 2017. 298 p.

6. Zharkov, K. Yu. Power Supply of Small Facilities: Modern Solutions. Moscow: Alliance, 2022. 220 p.

7. Laptev, S.G. Power Systems with Distributed Generation. St. Petersburg: Polytechnic, 2020. 334 p.

8. Markov, N. S. Intelligent Methods for Managing Power Systems. Kazan: University Book, 2021. 310 p.

9. Orekhov, A. P. Autonomous Photovoltaic Complexes: Design and Operation. Yekaterinburg: UralEnergo, 2018. 240 p.

10. Romanov, E. I. Mathematical Models in Power Engineering. Moscow: Nauka, 2019. 280 p.

11. Selivanov, V.G. Inverter Systems and Power Electronics. Moscow: TekhEnergo, 2020. 292 p.

12. Trofimov, R. V. Battery Systems in Autonomous Power Generation. St. Petersburg: EnergoMir, 2019. 268 p.

13. Shevchenko, A. N. Energy Balance Management in Hybrid Installations. Moscow: EnergoSistemy, 2021. 305 p.

14. Patent No. 2801633 C1 Russian Federation, IPC F24S 30/45. Device for tracking the Sun

with a receiving panel: No. 2022134103: declared 23.12.2022: published 11.08.2023 / O. V. Leshtaev, V. I. Zaginailov, N. A. Stushkina [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev". – EDN HBHPAX.

15. Leshtaev, O. V. Analysis of Power Quality Indicators in Power Supply Systems with Low-Capacity On-Grid Solar Power Plants / O. V. Leshtaev, N. A. Stushkina, V. I. Zaginailov // International Technical and Economic Journal. - 2021. - No. 5. - Pp. 48-53. - DOI 10.34286/1995-4646-2021-80-5-48-53. - EDN ZMGGEV.

16. Karlakov, D. S. Influence of Charging Voltage on the Reduction of Capacity of Lead-Acid Batteries / D. S. Karlakov, N. A. Stushkina // Agrotechnics and Energy Supply. - 2022. - No. 2 (35). - Pp. 25-29. - EDN WHJRHL.

17. Balabanov, N. S. Forecasting Solar Radiation: Current Trends // Energy Portal. — 2022. — URL: https://energy-portal.example (accessed: 26.11.2025).

18. Gridnev, P. A. Accuracy of Forecasting Algorithms for Distributed Generation // SolarTech Online. — 2021. — URL: https://solartech.example (accessed: 26.11.2025).

19. Using Neural Networks in Forecasting Solar Generation // EnergyAI. — 2023. — URL: https://energyai.example (accessed: 26.11.2025).

20. Intelligent Control of Hybrid Power Supply Systems // PowerSystems Hub. — 2020. — URL: https://powersystems.example (date of access: 26.11.2025).

21. Laboratory power systems: operational features // EngineeringLab. — 2022. — URL: https://englab.example (date of access: 26.11.2025).

22. Machine learning in energy flow forecasting // ML Energy Review. — 2024. — URL: https://mlenergy.example (date of access: 26.11.2025).

23. Methods for assessing the efficiency of hybrid power plants // EnergyMetrics. — 2021. — URL: https://energymetrics.example (date of access: 26.11.2025).

24. Application of battery systems in distributed energy // BatteryWorld. — 2020. — URL: https://batteryworld.example (date of access: 26.11.2025).

25. Modern solutions in microgeneration for educational facilities // MicroGrid Info. — 2023. — URL: https://microgridinfo.example (date of access: 26.11.2025).

Наталья Алексеевна Стушкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория электрических цепей» ФГБОУ ВО МТУСИ, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, стр. 39. Тел. +79057491761, e-mail: energo-stushkina@mail.ru

Екатерина Алексеевна Татаринцева, студентка 2 курса бакалавриата факультета «Информационные технологии» направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» ФГБОУ ВО МТУСИ, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, стр. 39, e-mail: lolikatena@gmail.com

Александра Вадимовна Браганец, студентка 2 курса бакалавриата факультета «Информационные технологии» направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» ФГБОУ ВО МТУСИ, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, стр. 39, e-mail: 2406avb@mail.ru

INTELLIGENT ALGORITHMS FOR MANAGING A HYBRID SOLAR PANEL-BASED POWER SUPPLY SYSTEM TO ENSURE UNINTERRUPTED POWER SUPPLY TO EDUCATIONAL LABORATORIES

N.A. Stushkina[1], E.A. Tatarintseva[1], A.V. Braganets[1]

[1]Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI)

Abstract. The expansion of the distributed energy segment and the active introduction of educational laboratories powered by renewable sources have significantly increased the requirements for the sustainability of local energy complexes [1]. Solar installations are characterized by significant variability of output, which creates sensitive fluctuations in power, especially in small laboratory systems with limited reserves [17]. In hybrid circuits combining photovoltaic modules, batteries, and network input, the accuracy of the short-term forecast plays a key role: it determines the charging strategy, load distribution, and overall energy efficiency [5]. More accurate estimates of future generation make it possible to reduce consumption peaks, reduce unnecessary switching of system elements, and maintain stable operating modes of educational complexes [18]. The purpose of the article is to determine which algorithms for predicting solar generation ensure the most stable functioning of a laboratory—type hybrid power supply system. To achieve the goal, the tasks are formulated:

1. to present modern approaches to forecasting solar generation and identify the conditions for their application in engineering energy systems;

2. describe the architecture of a hybrid laboratory power system and highlight the features of its operation;

3. evaluate how the accuracy of forecasts affects the management of the hybrid system and what measures can improve its efficiency.

The object of consideration is a hybrid power supply scheme, and the subject is photovoltaic generation forecasting algorithms that affect control modes [3]. The material is aimed at identifying how a correct assessment of future capacity increases the stability and functional flexibility of local energy complexes.

Keywords: renewable energy sources, hybrid power supply system, photovoltaic generation, forecasting algorithms, machine learning, battery circuit, network circuit.

Natalia Alekseevna Stushkina, Candidate *of* Technical Sciences, *Associate* Professor *of the* Department *of* "Theory *of* Electrical Circuits"*, Moscow State Institute of Physics and Technology,* Aviamotornaya str.*,* 8, *building* 39, Moscow, 111024. Tel. +79057491761, e-mail: *energo-stushkina@mail.ru*

Ekaterina Alekseevna Tatarintseva, 2nd year undergraduate student at the Faculty of Information Technology, Department of Training 09.03.01 "Informatics and Computer Engineering", Moscow State University of Higher Education, Aviamotornaya str., 8, building 39, 111024, Moscow, e-mail: lolikatena@gmail.com

Alexandra Vadimovna Braganets, 2nd year undergraduate student *at the* Faculty of Information Technology*, Department* of Training 03/9*.01* "Informatics and Computer Engineering"*,* MTUCI*,* Aviamotornaya str.*,* 8, *building* 39, Moscow, 111024., e-mail: 2406avb@mail.ru

УДК 621.548

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ ТЯГИ ОТ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

И.З. Сулейманов, Д.Ф. Балтиков

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

***Аннотация**. В работе рассмотрена система генерации электроэнергии, основанная на использовании воздушной тяги, создаваемой движущимися транспортными средствами. Представлена конструкция боковых и центральных ветровых турбин, размещаемых вдоль дорожного полотна и на разделительной полосе. Проведён анализ принципов работы системы, особенностей аэродинамического взаимодействия и факторов, влияющих на эффективность выработки электроэнергии. Дополнительно отмечены условия, при которых турбины демонстрируют наиболее стабильные показатели работы, а также влияние плотности транспортного потока на результирующую мощность. Установлено, что применение дорожных ветровых турбин позволяет использовать ранее не вовлекаемую механическую энергию, снижать нагрузку на энергосистемы и повышать устойчивость дорожной инфраструктуры. Представлены рекомендации по интеграции системы в современные транспортные объекты и оценены перспективы её применения в составе распределённых источников энергии.*

***Ключевые слова:** ветровая энергетика, транспортный поток, параллельное движение воздуха, аэродинамическая турбина, энергетическая эффективность дорог.*

Введение. Современное развитие транспортной сети сопровождается постоянным ростом энергопотребления и увеличением нагрузки на инфраструктуру. Одним из направлений повышения энергоэффективности является использование вторичных энергетических ресурсов, образующихся в процессе движения транспортных средств. Воздушная тяга, возникающая при перемещении автомобилей, традиционно не используется в практических целях, хотя обладает значительным энергетическим потенциалом.

Развитие технологий микрогенерации, ветровых турбин малой и средней мощности, а также конструкций с вертикальной осью вращения создаёт предпосылки для внедрения систем, способных улавливать воздушные потоки в пределах дорожного полотна. Рассматриваемая система ветровой генерации, основанная на турбинах с боковым и центральным размещением, является возможным решением, обеспечивающим выработку электроэнергии без изменения привычной транспортной схемы движения.

Целью работы является анализ конструкции и принципа действия системы генерации электроэнергии, использующей воздушную тягу от транспортного потока, а также оценка её применения в составе объектов дорожной инфраструктуры.

Условия, материалы и методы.

В качестве исходного материала использовано описание конструкции ветровой генерационной системы, включающей два типа турбин:

1. Боковая турбина - размещается вдоль обочины дороги.
2. Центральная турбина - устанавливается в зоне разделительной полосы между

встречными потоками.

Методологическая основа исследования включает:

- анализ аэродинамических характеристик воздушного потока, возникающего от движения транспортных средств;
- изучение конструктивных схем турбин с вертикальной осью;
- оценку особенностей движения воздуха в ограниченных каналах;
- системный анализ перспектив внедрения в существующую дорожную инфраструктуру.

Конструкция и принцип работы системы. Боковая турбина включает корпус, воздушный канал с входным, центральным и выходным отверстиями, лопастной блок и электрогенератор [1]. Воздушный поток, создаваемый движущимися транспортными средствами, направляется внутрь канала, проходит через область расположения лопастей и вызывает вращение вала.

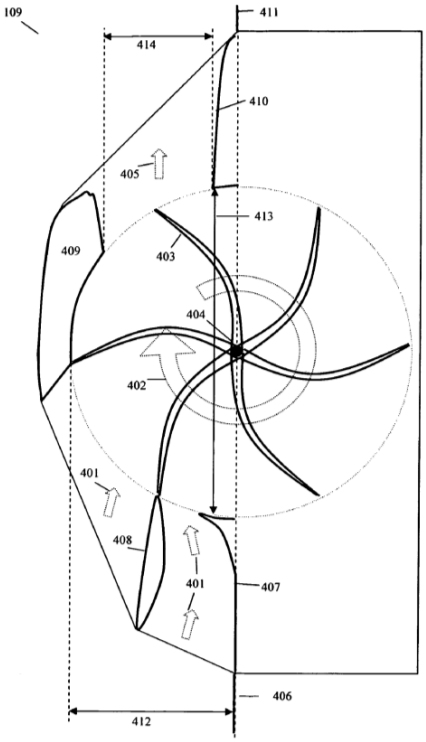


Рисунок 1 - Схема боковой турбины дорожного типа

Центральная турбина содержит два противоположных воздушных канала, обеспечивающих одновременную работу от потоков, возникающих на обеих сторонах дороги [2-4]. Такая конфигурация позволяет стабилизировать направление вращения и повышать эффективность преобразования энергии.

Каждый канал включает:

- входное отверстие, ориентированное против направления движения транспорта;
- выходное отверстие, совпадающее с направлением воздушного потока;
- центральное окно, в котором размещена рабочая часть турбины.

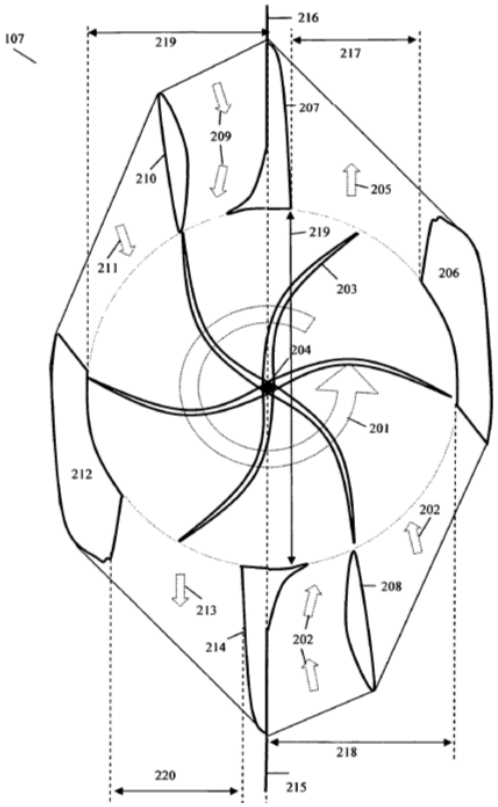


Рисунок 2 - Конструкция центральной турбины с двумя воздушными каналами

Аэродинамические особенности. Воздушный поток, возникающий при движении транспортных средств, характеризуется следующими свойствами [5,6]:

- высокая скорость при малых расстояниях от поверхности автомобилей;
- направленность, совпадающая с вектором движения;
- наличие турбулентных зон и пульсаций давления.

Корпус турбины формирует направляющий канал, уменьшающий хаотичность движения воздуха и улучшая условия вращения лопастей.

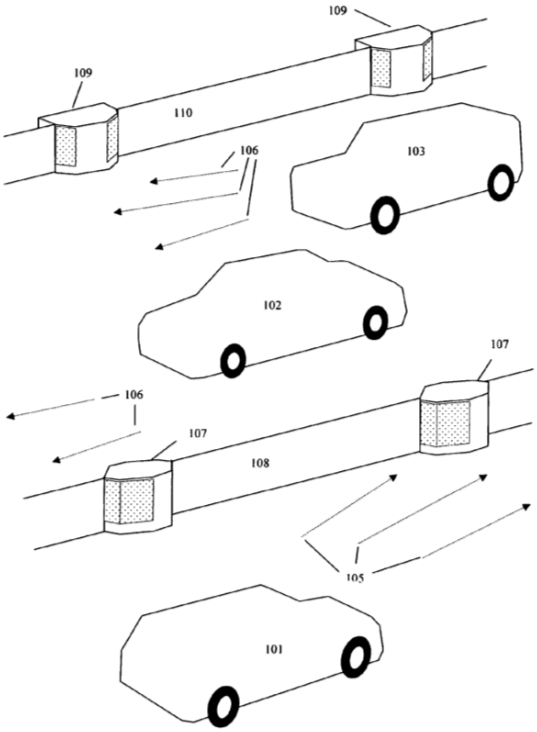


Рисунок 3 – Расположение турбин

Результаты и обсуждение. Анализ конструкции дорожных турбин показывает, что система позволяет использовать ранее не вовлекаемый в энергетический цикл ресурс. По оценкам, мощность воздушного потока, создаваемого легковыми автомобилями на скорости выше 70 км/ч, может достигать значений, достаточных для вращения маломощных турбин.

Использование центральных турбин обеспечивает более равномерное распределение нагрузки и повышает эффективность работы при высокой транспортной загрузке [7,8]. Кроме того, их размещение на разделительной полосе снижает воздействие турбулентных выбросов на обочину и способствует стабильности аэродинамического канала.

Применение боковых турбин рационально на участках с односторонним движением или при наличии ограничений по установке оборудования в центре дороги.

Система может использоваться для:

- питания дорожного освещения;
- энергоснабжения датчиков интеллектуальных транспортных систем;
- обеспечения автономной работы камер наблюдения;
- формирования локальных энергокомплексов на участках трасс.

Таким образом, технология представляет собой перспективное направление повышения энергоэффективности транспортной инфраструктуры без значительных конструктивных вмешательств.

Вывод. В результате проведённого анализа можно сделать вывод, что рассмотренная система ветровой генерации, использующая воздушную тягу от движения транспортных средств, является эффективным и перспективным решением для получения электрической энергии на дорогах. Конструкции турбин и направляющие каналы обеспечивают стабильную работу системы на дорогах различного типа без нарушения транспортного потока, повышая аэродинамическую эффективность и устойчивость турбин. Применение такой системы позволяет снижать нагрузку на традиционные источники энергоснабжения дорожной инфраструктуры, обеспечивая при этом автономность работы её элементов. Внедрение подобных технологий способствует повышению экологичности и энергоэффективности автомобильных дорог.

Список использованных источников:

1. Балабанов В. И. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие / В. И. Балабанов, С. В. Железова, Е. В. Березовский [и др.]. — Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2013. — 143 с. — ISBN 978-5-9675-0866-7.

2. Горелов И. П. Аэродинамика потоков в малых воздушных каналах / И. П. Горелов. — Москва: Транспорт, 2015. — 212 с.

3. Линенко А. В. Интеллектуальные технологии в энергетике транспортных объектов / А. В. Линенко. — Уфа: Башкирский ГАУ, 2023. — 132 с.

4. Лукьянов В. В. Инновационные методы повышения устойчивости дорожных систем / В. В. Лукьянов. — Уфа: Башкирский ГАУ, 2022. — 156 с.

5. Пономарев В. Н. Микрогенерация в энергетической инфраструктуре / В. Н. Пономарев. — Казань: ЭнергоИздат, 2020. — 184 с.

6. Chen T. Power generation system utilizing wind draft from vehicular traffic: Patent US 7,427,173 B2. — Washington: USPTO, 2008. — 14 p.

7. Электроснабжение базовой станции сотовой связи на базе фото-ветро-дизельных энергоустановок / Д. Ф. Балтиков, Э. Ф. Муратова, Д. Р. Ибрагимов, И. И. Габдуллина //

Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. – Т. 8, № 4(30). – С. 125-129. – EDN WSHZNI.

8. Балтиков, Д. Ф. Гибридная система электроснабжения децентрализованной базовой станции мобильной связи с применением фото-, ветро-, дизель-генераторов / Д. Ф. Балтиков, И. И. Галимова, М. С. Гарафутдинова // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК : материалы международной научно-практической конференции в рамках XXXI Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2021», Уфа, 23–26 марта 2021 года / МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ; МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН; ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»; ООО «БАШКИРСКАЯ ВЫСТАВОЧНАЯ КОМПАНИЯ». Том Часть 2. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2021. – С. 200-206. – EDN HXGSQH.

Bibliography:

1. Balabanov, V. I. Navigation Technologies in Agriculture. Coordinate Farming / V. I. Balabanov, S. V. Zhelezova, E. V. Berezovsky [et al.]. — Moscow: Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, 2013. — 143 p. — ISBN 978-5-9675-0866-7.

2. Gorelov, I. P. Aerodynamics of Flows in Small Air Channels / I. P. Gorelov. — Moscow: Transport, 2015. — 212 p.

3. Linenko, A. V. Intellectual Technologies in the Energy Sector of Transport Facilities / A. V. Linenko. — Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2023. — 132 p.

4. Lukyanov, V. V. Innovative Methods for Improving the Sustainability of Road Systems / V. V. Lukyanov. — Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2022. — 156 p.

5. Ponomarev, V. N. Microgeneration in the Energy Infrastructure / V. N. Ponomarev. — Kazan: EnergoIzdat, 2020. — 184 p.

6. Chen, T. Power generation system utilizing wind draft from vehicular traffic: Patent US 7,427,173 B2. — Washington: USPTO, 2008. — 14 p.

7. Power Supply of a Cellular Base Station Based on Photo-Wind-Diesel Power Plants / D. F. Baltikov, E. F. Muratova, D. R. Ibragimov, I. I. Gabdullina // International Journal of Information Technology and Energy Efficiency. - 2023. - Vol. 8, No. 4 (30). - P. 125-129. - EDN WSHZNI.

8. Baltikov, D. F. Hybrid power supply system of a decentralized base station for mobile communications using photo-, wind-, and diesel generators / D. F. Baltikov, I. I. Galimova, M. S. Garafutdinova // Current state, traditions, and innovative technologies in the development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference within the framework of the XXXI International specialized exhibition "Agrocomplex-2021", Ufa, March 23–26, 2021 / MINISTRY OF AGRICULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION; MINISTRY OF AGRICULTURE OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN; FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION “BASHKIR STATE AGRICULTURAL UNIVERSITY”; LLC "BASHKIR EXHIBITION COMPANY" Volume Part 2. - Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2021. - P. 200-206. – EDN HXGSQH.

Сулейманов Ильгиз Зуфарович - магистр 1 курса энергетического факультета ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. Адрес: г. Уфа, 50-лет Октября, 34, e-mail: ilgiz.sulya@mail.ru
Балтиков Денис Фаилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. Адрес: г. Уфа, 50-лет Октября, 34, тел. +7 (347) 252-66-10, e-mail: baltikov21@gmail.com

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF ROAD INFRASTRUCTURE BY USING WIND TENSION FROM THE TRANSPORT FLOW

I.Z. Suleymanov, D.F. Baltikov

FSBEI HE Bashkir State Agrarian University

Abstract. The paper considers a system for generating electricity based on the use of air thrust created by moving vehicles. It presents the design of side and central wind turbines placed along the roadway and on the median strip. The paper analyzes the principles of the system's operation, the features of aerodynamic interaction, and the factors that influence the efficiency of electricity generation. Additionally, it highlights the conditions under which the turbines exhibit the most stable performance, as well as the impact of traffic density on the resulting power output. It has been established that the use of road wind turbines allows for the use of previously unused mechanical energy, reduces the load on energy systems, and increases the sustainability of road infrastructure. Recommendations for integrating the system into modern transport facilities have been presented, and the prospects for its use as part of distributed energy sources have been assessed.

Keywords: wind energy, traffic flow, parallel air flow, aerodynamic turbine, energy efficiency of roads.

Suleymanov Ilgiz Zufarovich - Master of the 1st year of the Faculty of Energy of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Bashkir State Agrarian University. Address: 50-let Oktyabrya, 34, Ufa, e-mail: ilgiz.sulya@mail.ru
Baltikov Denis Failevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Automation of Technological Processes of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Bashkir State Agrarian University. Address: 50-let Oktyabrya, 34, Ufa, tel. +7 (347) 252-66-10, e-mail: baltikov21@gmail.com

УДК 621.313.3.025.3-78

УСТРОЙСТВО МОНИТОРИНГА ЗАГРУЗКИ МАЛОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

Попрядухин Е.В.[1], Крамской С.В.[1], Панфилов А.А.[1], Виноградов А.В.[1,2]

[1]Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина
[2]РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Аннотация. *Представлен способ увеличения срока службы электрогенератора с помощью устройства мониторинга загрузки. Произведён анализ средств автоматизации и систем мониторинга для контроля мощности и загрузки электрогенераторов малой мощности. Выявлена актуальность разработки устройства мониторинга загрузки электрогенераторов (УМЗЭГ). В ходе анализа литературных источников было выявлено, что системы мониторинга для контроля загрузки являются критически важными инструментами для пользователей электрогенераторных установок. Однако существующие решения для генераторов малой мощности не предполагают контроля пофазной загрузки. Контроль пофазной загрузки генератора с помощью УМЗЭГ позволяет снизить несимметрию токов и напряжений на этапе подключения новых нагрузок, что повышает ресурс генератора. Применение данного устройства способствует повышению надёжности, снижению затрат, обеспечению безопасности работы генераторного оборудования.*

Ключевые слова: *электрогенератор, надёжность электроснабжения, мониторинг загрузки, устройство УМЗЭГ.*

Введение.

В последние годы наметился тренд на рост использования генераторов малой мощности, находящихся до 40 кВт [1], которые особенно чувствительны к несбалансированности нагрузок, приводящей к механической вибрации и быстрому перегреву ротора генератора [1]. В исследовании, проведенном в НИУ ВШЭ Бутовым А.М. [2], установлено, что за три года (2018-2021 гг.) в Российской Федерации было продано 1190000 шт. генераторов, из которых большую часть составляют генераторные установки с бензиновыми двигателями. Так как в сельских электрических сетях имеются частые перебои в электроснабжении, то наблюдается явный тренд увеличения продаж генераторов для частного использования. Так в 2018 году доля генераторов с бензиновыми двигателями в частном использовании составляла только 50%, однако в 2019 г. эта доля увеличилась до 76%, в 2020 г. – до 83%, а в 2021 г. – до 85%. Несмотря на значительный рост числа генераторов в частном использовании, генераторы малой мощности, в отличие от мощных генераторов, работающих на больших электростанциях, не оснащаются дорогостоящими средствами защиты, особенно для защиты от несимметрии напряжений [3]. Это объясняется тем фактом, что проблему несимметрии напряжений принято решать за счет перераспределения нагрузок в линиях электропередачи и/или установки компенсирующих устройств [2, 3]. Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендует производить отключение асинхронных генераторов при несимметрии напряжений в электрических системах в 2 % [4]. При этом ГОСТ РФ 32144-2013 также устанавливает

значения для несимметрии напряжений (коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности и по нулевой последовательности) не более 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю и 4 % - в течение 100 % времени [4]. Таким образом, разработка новых экономически эффективных решений проблемы несимметрии напряжений является актуальной задачей.

Материалы и методы.

В работе был произведён литературный обзор с целью обоснования разработки устройства мониторинга загрузки электрогенераторов малой мощности. Разработан способ применения данного устройства и представлена его структурная схема. Представлен экспериментальный образец устройства.

Результаты и обсуждение.

Автоматизация электрогенераторных установок малой мощности представляет собой важную задачу, так как эти установки обычно используются в небольших промышленных, торговых и жилых объектах, где требуется надёжное и эффективное электроснабжение. В более мощных электрогенераторных установках мощностью от 100 кВт используются различные системы автоматики для обеспечения их надежной работы, управления и защиты [5,6]. Автоматизированная установка предполагает наличие устройств и систем, обеспечивающих выполнение пусковых операций, контроль и управление работой в автоматическом режиме. Такие установки довольно точно работают в заданном режиме и без участия персонала, чья основная функция, в основном, сводится к настройке автоматизированной системы согласно заданному режиму, регулярным осмотрам, подготовкой к эксплуатации и ремонту [7].

Комплексная автоматизация дизельных электростанций по ГОСТ 33115-2014 включает автоматическую регулировку: скорости вращения коленвала; напряжения на генераторе; температурного режима для воды и масла в двигателе; автозапуск и перевод под нагрузку; сигналов состояния агрегатов двигателя; защитной остановки при аварийных значениях температуры, давления, частоты вращения и т.д.; дистанционного отключения дизельного двигателя.

Правильно спроектированная система автоматизации позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы и снизить риски, связанные с авариями. В условиях современных требований к качеству и надёжности электроснабжения, автоматизация генераторных установок становится не только целесообразной, но и необходимой. Эти системы и устройства обеспечивают надежность, безопасность и эффективное управление электрогенераторными установками. Выбор конкретных элементов автоматики может зависеть от типа генератора, его назначения и специфических условий эксплуатации [8].

Системы мониторинга для контроля мощности генераторов играют важную роль в обеспечении надёжности и эффективности работы электрогенераторных установок. Они позволяют оперативно следить за состоянием генераторов, выявлять неисправности и оптимизировать работу оборудования. Мониторинг мощности генераторов осуществляется с использованием различных методов и технологий, которые позволяют обеспечить надёжную работу оборудования и предотвратить его аварии. Системой удаленного мониторинга и управления электрогенератором производится координация работы всей системы резервного электроснабжения. Также осуществляется удаленный мониторинг всех параметров установки, вместе с противопожарной и охранной системами, включая и параллельную работу нескольких установок [7].

Системой удаленного мониторинга и управления производится координация работы

всей системы резервного электроснабжения. Все сведения о работе генераторов, двигателей, панелей переключения нагрузки и других устройств в непрерывном режиме подвергаются обработке микропроцессором и анализируются. Целиком автоматизированный сбор и документирование всех событий. Возможно включение в систему дополнительных объектов, таких как топливные баки (контроль текущего уровня и расхода топлива), зарядные аккумуляторные устройства (контроль уровня заряда) и другие. Любой объект мониторинга доступен через сеть Интернет. Система оповещения допускает передачу информации на e-mail, пейджер, телефонный номер и пр. [7].

Электрогенераторы становятся незаменимыми помощниками в загородных домах, на дачах, предприятиях и даже в промышленности. Однако даже самая надежная техника требует контроля, особенно если объект, где установлен генератор, остается без присмотра на длительное время. Одним из самых эффективных решений для дистанционного мониторинга и управления становится GSM-модуль, который предоставляет владельцу возможность в реальном времени отслеживать состояние генератора и оперативно реагировать на любые сбои.

Однако большинство маломощных генераторов, эксплуатируемых на производстве и в быту не имеют системы автоматизации, контроля и индикации нагрузки. Практика показывает, что часто эксплуатация электрогенераторов осуществляется не в соответствии с инструкциями. Это, а также особенности сельскохозяйственной электрической нагрузки приводят к повышенной повреждаемости генераторов. Несимметрия токов и напряжений является одной из причин снижения качества электроэнергии и надёжности электроснабжения. Персонал, обслуживающий генератор не видит возникшей проблемы с несимметрией или перегрузкой, из-за чего генератор может выйти из строя. Необходима разработка новых способов и средств защиты генераторов распределённой генерации от различных ненормальных и аварийных режимов, в том числе, связанных с несимметрией токов и напряжений. Это позволит предотвратить резко несимметричные режимы работы генераторов и их перегрузку, повысить уровень состояния систем электроснабжения предприятий [14]. Поэтому актуальной задачей является создание средств мониторинга и индикации пофазной нагрузки электрогенераторов.

Требования к устройству включают в себя необходимый функционал и условия эксплуатации. Разрабатываемое устройство мониторинга и индикации пофазной загрузки и перегрузки генераторов малой мощности УМЗЭГ используется следующим способом (рисунок 1). С помощью соответствующих датчиков контролируют ток и напряжение на выводах генератора и мощность по фазам, определяют наличие несимметрии по току, напряжению и нагрузке, выделяют наиболее и наименее нагруженные фазы. Отображают допустимые ток, напряжение и мощность по фазам, фактические ток, напряжение и мощность по фазам, степень загрузки фаз, возможную и рекомендуемую свободные мощности нагрузки по фазам, осуществляют световую индикацию о недопустимой несимметрии по фазам, световую и звуковую индикацию о перегрузке по фазам. На основе указанной информации принимают решение о перераспределении нагрузки, при подключении дополнительной однофазной нагрузки определяют на какую фазу её рационально подключить [9].

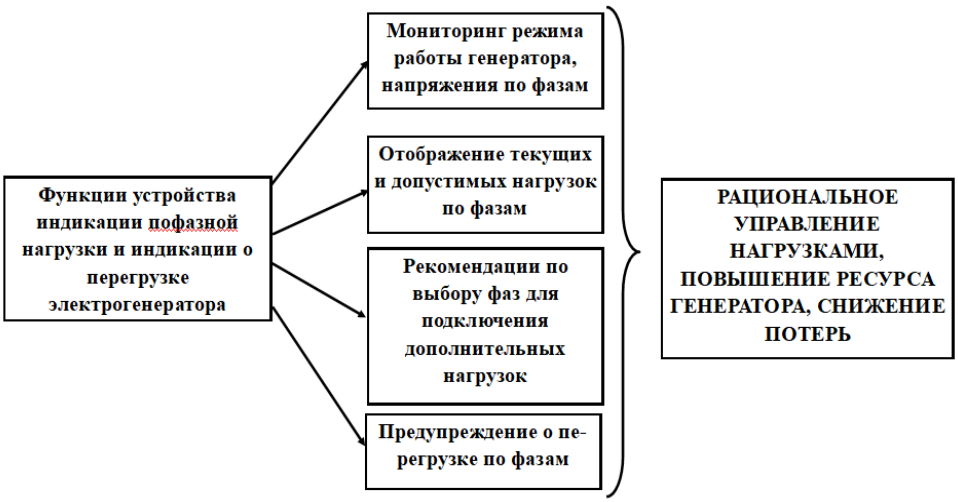


Рисунок 1 – Способ применения УМЗЭГ для рационального управления нагрузками электрогенератора [9]

Исходя из вышеприведённого способа основные функциональные возможности данного устройства можно сформулировать следующим образом. Устройство должно обеспечивать: измерение напряжения, коэффициента мощности (cos φ), тока и мощности по всем трём фазам и нулевому проводнику; отображение текущих напряжения, коэффициента мощности (cos φ), тока и мощности по фазам; задачу и отображение допустимой мощности по фазам; отображение разрешённой и рекомендуемой дополнительной мощности нагрузки по фазам; индикацию и сигнализацию о превышении допустимой мощности по каждой из фаз; индикацию и сигнализацию о превышении допустимой несимметрии тока и напряжения; возможность подключения к генератору без вмешательства в его внутренние цепи для эксплуатируемых генераторов с помощью переходного устройства; архивирование данных и передачу информации удалённому оператору. Алгоритм реализации способа представлен в [11]. В качестве прототипа устройства приняты таймеры-электросчётчики мобильные портативные (ТЭМП) разной модификации [12, 13].

Описанные функциональные возможности позволяют УМЗЭГ обеспечивать мониторинг и индикацию пофазной загрузки и перегрузки генератора. Это позволит повысить эффективность обслуживания генераторной установки.

Устройство планируется устанавливать непосредственно на корпусе, или щите генераторной установки с помощью специальной крепёжной платформы или магнитов в положении, удобном для восприятия отображаемой информации оператором установки. Устройство должно надежно работать после длительного хранения при температуре воздуха от – 35˚С до + 40˚С и относительной влажности воздуха от 20% до 85%. Устройство должно быть устойчиво к воздействию влаги и вибрации. Степень защиты контактов не менее IP-44. Устройство должно обеспечивать продолжительный режим работы в течение суток или на время работы электрогенератора. Устройство будет предназначено для использования в трехфазной или (в модификации для однофазных генераторов) однофазной электрической сети переменного тока с напряжением 220/380В и частотой 50 Гц. Техническое обслуживание устройства должно осуществляться не реже одного раза в 6 месяцев подготовленным электротехническим персоналом [9].

На рисунке 2 приведена структурная схема разрабатываемого устройства [10]. Принцип работы следующий. Трансформаторы тока и напряжения подключаются к фазам генератора

и считывают данные, которые с помощью модуля измерения передаются на дисплей. Дисплей показывает персоналу полученные значения. Индикатор показывает допустимую нагрузку на генератор. Связь с внешним устройством осуществляется через канал связи «RS-485». Запитываются все комплектующие с помощью блока питания 220/12/5В (стабилизатор напряжения). Так же в устройстве устанавливаются реле для управления нагрузкой. Все комплектующие связываются и взаимодействуют между собой с помощью контроллера «STM 32» [10].

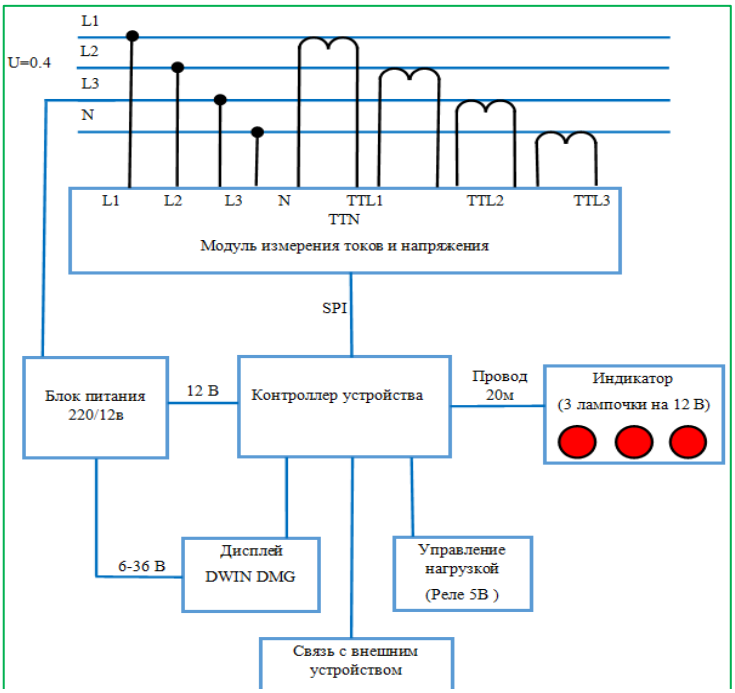


Рисунок 2 - Структурная схема УМЗЭГ

При выполнении всех приведённых функциональных и технических требований УМЗЭГ позволит улучшить работу электрогенераторных установок.

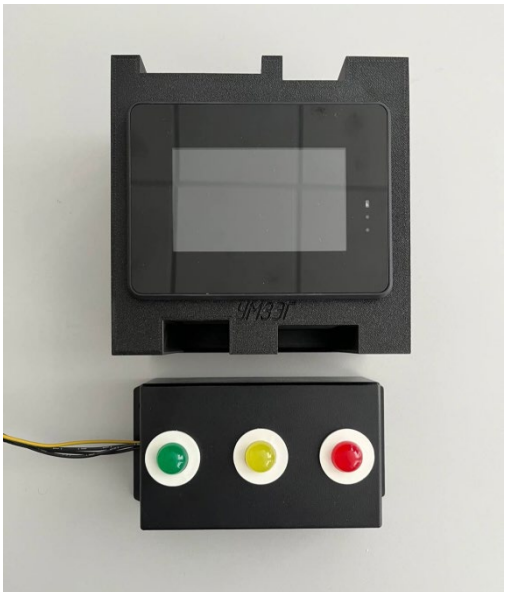


Рисунок 3 – Внешний вид экспериментального образца устройства «УМЗЭГ»

Это достигается за счёт возможности обеспечить минимизацию несимметрии токов и напряжений генератора на этапе подключения нагрузки, не допущения перегрузки

генератора. Таким образом, применение УМЗЭГ позволит предотвращать выход из строя генераторов, повышать ресурс их работы и снижать в них потери электроэнергии. На рисунке 3 показан внешний вид УМЗЭГ.

Выводы.

Несимметричные режимы работы часто возникают при работе трёхфазных генераторов вследствие несбалансированной нагрузки по фазам. Это приводит к сокращению ресурса генераторного оборудования, выходу его из строя и требует создания средств симметрирования и управления режимами работы генераторов, средств мониторинга загрузки фаз генератора (УМЗЭГ). Существующие решения по автоматизации и мониторингу генераторов направлены прежде всего на обеспечение автономной работы данных установок и не предполагают мониторинга загрузки фаз генератора для выбора рационального режима работы, снижения небаланса нагрузок. Разработка устройства УМЗЭГ позволяет защитить электростанцию от асимметрии системы, несбалансированных нагрузок, неисправностей системы и обрыва фаз. Применение УМЗЭГ улучшает систему мониторинга для контроля мощности генераторов, что способствует повышению надежности, снижению затрат, обеспечению безопасности работы оборудования.

В данной работе был представлен экспериментальный образец устройства, позволяющий реализовать все требуемые функциональные возможности для мониторинга и индикации нагрузки электрогенераторов.

Список использованных источников

1. Способ симметрирования фазных токов и напряжений, выдачи всей мощности генератора на однофазную нагрузку, повышения надёжности питания нагрузок генератора. Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2831133C1/ru (дата обращения 03.09.2025г.)
2. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. 2014. № 3. С.28–32. EDN: RVCDOH (дата обращения 05.09.2025г.)
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // Системы Методы Технологии. 2016. Т. 3, № 31. С. 85–93. EDN: XQSNZJ (дата обращения 07.09.2025г.)
4. Булатов, Ю. Н. Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 3(31). – С. 85-93. – DOI 10.18324/2077-5415-2016-3-85-93. – EDN XQSNZJ (дата обращения 09.09.2025г.)
5. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРНЫЕ С ДИЗЕЛЬНЫМИ И ГАЗОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ. Нормативный документ. Режим доступа: https://protect.gost.ru/default.aspx/document.aspx?control=7&baseC=1&page=0&month=1&year=1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=200398 (дата обращения 10.09.2025г.)
6. СТЕПЕНИ АВТОМАТИЗАЦИИ ДГА (ДЭС) по ГОСТ 14228-80 «ДИЗЕЛИ и ГАЗОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ» (классификация по объему автоматизации). Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://universal22.ru/wp-content/uploads/2020/12/SA.pdf (дата обращения 12.09.2025г.)
7. Мониторинг и удаленное управление электростанциями ДЭС. Электронный

ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://www.d-system.ru/news/27/ (дата обращения 15.09.2025г.)

8. Системы дистанционного мониторинга и управления электростанцией. Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://dizelnye-generatory.com/dop-oborudovanie/sistemy-distancionnogo-monitoringa-i-upravleniya-elektrostanciey/29 Чечевицына Л. Н. Экономика организации: учебное пособие / Л. Н. Чечевицына, Е. В. Хачадурова. Ростов-на-Дону: Феникс, 2017. 382 с. (дата обращения 16.09.2025г.)

9. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВУ ИНДИКАЦИИ ПОФАЗНОЙ НАГРУЗКИ И ПЕРЕГРУЗКИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА. Попрядухин Е.В., Крамской С.В., Панфилов А.А., Виноградов А.В. Агротехника и энергообеспечение. 2024. № 4 (45). С. 50-56. (дата обращения 18.09.2025г.)

10. ВАРИАНТЫ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ УСТРОЙСТВА ИНДИКАЦИИ ПОФАЗНОЙ НАГРУЗКИ И ИНДИКАЦИИ О ПЕРЕГРУЗКЕ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА. Виноградов А.В., Попрядухин Е.В., Крамской С.В. В сборнике: Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Орел, 2024. С. 384-391. (дата обращения 20.09.2025г.)

11. Виноградов, А. В. Структурная схема и алгоритм работы устройства мониторинга и контроля пофазной загрузки электрогенераторов / А. В. Виноградов, В. Е. Большев, С. В. Крамской // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2024. – Т. 71, № 4(57). – С. 49-54. – DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-4-49-54. – EDN WRAOVY

12. Выявление участков ЛЭП с повышенными потерями электроэнергии с помощью мобильных портативных таймеров-электросчетчиков / А. В. Виноградов, А. В. Букреев, А. В. Виноградова, В. Е. Большев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67, № 3(40). – С. 31-36. – DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-3-31-36. – EDN ECDKJH.

13. Букреев, А. В. Разработка технических средств обследования электрических сетей сельскохозяйственных объектов / А. В. Букреев, А. В. Виноградов. – Орёл: Общество с ограниченной ответственностью полиграфическая фирма «Картуш», 2023. – 196 с. – ISBN 978-5-9708-1079-8. – EDN KFFOGK/

14. Грачева, Е. И. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 1-2. – С. 95-101. – EDN ZBTISD.

Bibliography

1. A method for balancing phase currents and voltages, delivering the entire generator power to a single-phase load, and increasing the reliability of generator loads. An electronic resource. The title from the screen. Access mode: https://patents.google.com/patent/RU2831133C1/ru (accessed 03.09.2025)

2. Khvatov O.S., Darienkov A.B. A power plant based on a variable-speed diesel generator // Electrical engineering. 2014. No. 3. pp.28-32. EDN: RVCDOH (accessed 05.09.2025)

3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. The effect of an asymmetric load on the operation of turbogenerators of distributed generation plants // Systems and Methods of Technology. 2016. Vol. 3, No. 31. Pp. 85-93. EDN: XQSNZJ (accessed 07.09.2025)

4. Bulatov, Yu. N. The effect of an asymmetric load on the operation of turbogenerators of distributed generation plants / Yu. N. Bulatov, A.V. Kryukov // Systems. Methods. Technologies. –

2016. – № 3(31). – Pp. 85-93. – DOI 10.18324/2077-5415-2016-3-85-93. – EDN XQSNZJ (accessed 09.09.2025)

5. ELECTRIC GENERATOR SETS WITH DIESEL AND GAS INTERNAL COMBUSTION ENGINES.GENERAL TECHNICAL CONDITIONS. A regulatory document. Access mode: https://protect.gost.ru/default.aspx/document.aspx?control=7&baseC=1&page=0&month=1&year=1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=200398 (accessed 09/10/2025)

6. DEGREES OF AUTOMATION of DGA (DES) according to GOST 14228-80 "AUTOMATED DIESEL and GAS ENGINES" (classification by automation volume). An electronic resource. The title from the screen. Access mode: https://universal22.ru/wp-content/uploads/2020/12/SA.pdf (accessed 12.09.2025)

7. Monitoring and remote control of DES power plants. An electronic resource. The title from the screen. Access mode: https://www.d-system.ru/news/27 / (accessed 09/15/2025)

8. Remote monitoring and control systems of the power plant. An electronic resource. The title from the screen. Access mode: https://dizelnye-generatory.com/dop-oborudovanie/sistemy-distancionnogo-monitoringa-i-upravleniya-elektrostanciey/29 Chechevitsyna L. N. Economics of organization: a textbook / L. N. Chechevitsyna, E. V. Khachadurova. Rostov-on-Don: Phoenix, 2017. 382 p. (accessed 16/09/2025)

9. FUNCTIONAL AND BASIC TECHNICAL REQUIREMENTS FOR THE INDICATION OF PHASE-BY-PHASE LOAD AND OVERLOAD OF THE ELECTRIC GENERATOR. Popryadukhin E.V., Kramskoy S.V., Panfilov A.A., Vinogradov A.V. Agrotechnics and energy supply. 2024. No. 4 (45). pp. 50-56. (accessed 18/09/2025)

10. VARIANTS OF STRUCTURAL SCHEMES FOR PHASE-BY-PHASE LOAD INDICATION AND OVERLOAD INDICATION OF THE ELECTRIC GENERATOR. Vinogradov A.V., Popryadukhin E.V., Kramskoy S.V. In the collection: Intelligent systems in the agricultural and construction complex. Collection of materials of the International Scientific and practical Conference. Orel, 2024. pp. 384-391. (accessed 20.09.2025).

11. Vinogradov, A.V. Structural diagram and algorithm of operation of a device for monitoring and controlling phase–by–phase loading of electric generators / A.V. Vinogradov, V. E. Bolshev, S. V. Kramskoy // Electrical technologies and electrical equipment in the agroindustrial complex. – 2024. – Vol. 71, No. 4(57). - pp. 49-54. - DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-4-49-54. – EDN WRAOVY

12. Identification of power transmission line sections with increased electricity losses using mobile portable timer meters / A.V. Vinogradov, A.V. Bukreev, A.V. Vinogradova, V. E. Bolshev // Electrical technologies and electrical equipment in the agro–industrial complex. - 2020. – Vol. 67, No. 3(40). – pp. 31-36. – DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-3-31-36. – EDN ECDKJH.

13. Bukreev, A.V. Development of technical means of inspection of electrical networks of agricultural facilities / A.V. Bukreev, A.V. Vinogradov. – Orel: Limited Liability Company printing company "Cartouche", 2023. – 196 p. – ISBN 978-5-9708-1079-8. – EDN KFFOGK.

14. Gracheva, E. I. Investigation of probabilistic characteristics of power supply systems / E. I. Gracheva, R. R. Sadykov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. – 2017. – Vol. 19, No. 1-2. – pp. 95-101. – EDN ZBTISD.

Евгений Владимирович Попрядухин, студент 1 курса магистратуры факультета «Агротехники и энергообеспечения» направления подготовки 13.04.02. «Электроэнергетика и электротехника», Орловский ГАУ, popryaduhinzhenya@mail.ru

Сергей Викторович Крамской, аспирант ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
Александр Александрович Панфилов начальник отдела эксплуатации автоматизированных систем диспетчерского управления в филиале ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго»
Александр Владимирович Виноградов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69; профессор кафедры «Электроснабжение и теплоэнергетика», РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 127434, г.Москва, улица Тимирязевская, д.49. Тел. 8(920)2879024 e-mail: winaleksandr@gmail.com;

A WAY TO INCREASE THE SERVICE LIFE OF ELECTRIC GENERATORS USING A LOAD MONITORING DEVICE

Popryadukhin E.V.

Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin

Annotation. A method for increasing the service life of an electric generator using a load monitoring device is presented. The analysis of automation tools and monitoring systems for monitoring the power and loading of low-power generators has been carried out. The relevance of the development of a device for monitoring the loading of electric generators (UMZEG) has been revealed. During the analysis of literature sources, it was revealed that monitoring systems for load control are critically important tools for users of electric generating plants. However, existing solutions for low-power generators do not involve phase-by-phase loading control. Monitoring the phase-by-phase loading of the generator using UMZEG allows you to reduce the asymmetry of currents and voltages at the stage of connecting new loads, which increases the life of the generator. The use of this device helps to increase reliability, reduce costs, and ensure the safety of generator equipment.

Keywords: electric generator, reliability of power supply, load monitoring, UMZEG device.

Evgeny Vladimirovich Popryadukhin, 1st year Master's student at the Faculty of Agricultural Engineering and Energy Supply, training area 04/13/02. "Electric Power Engineering and Electrical Engineering", Oryol State Agrarian University, popryaduhinzhenya@mail.ru
Sergey Viktorovich Kramskoy, postgraduate student at the Oryol State Agrarian University
Alexander Alexandrovich Panfilov, Head of the Department of Operation of Automated Dispatch Control Systems at the branch of PJSC ROSSETI Center – Orelenergo
Alexander Vladimirovich Vinogradov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor; Professor, Department of Power Supply, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodina Street, Oryol, 302019; Professor, Department of Power Supply and Heat Power Engineering, Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Street, Moscow, 127434. Tel. 8(920)2879024, e-mail: winaleksandr@gmail.com

УДК 621

АНАЛИЗ РЫНКА ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ В РОССИИ

Попрядухин Е.В.

Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина

Аннотация. *При электроснабжении сельских территорий имеется множество вариантов применения бензиновых и дизельных электрогенераторов различных видов и мощностей. Основными сферами применения данных установок являются автономное и резервное электроснабжение частных домов и поселков, малых коммерческих и сельскохозяйственных объектов. Анализ рынка электрогенераторов для сельских потребителей демонстрирует устойчивый рост. Производство данных установок в России за последние пять лет выявляет высокую положительную динамику. Также отмечаются тенденции роста локализации производства и расширения областей применения. Изучение конструктивных особенностей данного оборудования и практического опыта его эксплуатации позволяет определить перспективные направления для научно-технических разработок. Актуальными являются исследования направленные на повышение энергоэффективности, надежности и безопасности работы электрогенераторов, области их применения, выявление причин неисправностей и разработку рекомендаций по повышению эффективности использования данного оборудования.*

Ключевые слова: *сельские электрические сети, надёжность электроснабжения, малая генерация, анализ, рынок, производство.*

Введение.

Недостаточно высокая надёжность электроснабжения сельских потребителей, необходимость обеспечения резервирования потребителей 1 категории от собственного источника электроэнергии, организация строительных, дорожных и других работ, организация электроснабжения удалённых от централизованных электрических сетей потребителей стимулируют рынок электрогенераторных установок. Запрос имеется на применение электрогенераторов в частных домовладениях как для резервного электроснабжения, так и для электрификации различных работ, удалённых от централизованного источника электроэнергии [1].

Проведённый в [2] анализ различных способов электроснабжения удаленных потребителей показал, что зачастую строительство линий электропередачи для них экономически и технически неэффективно. Показаны недостатки использования альтернативных видов электростанций, использующих возобновляемые источники энергии. Сделано заключение о преимущественном использовании бензиновых и дизельных электростанций и необходимости развития этого вида генерации [2].

Как отмечается в [3,4], 2/3 территории России не имеют централизованного электроснабжения. На этой территории проживает около 20 миллионов человек. На 2013-2014 годы более 31% электроэнергии для них производились с помощью дизельгенераторных установок (ДГУ) [3,4]. Не значительно изменилась эта ситуация и в наше время.

В 2020-2024 гг продажи электрогенераторов в России возросли в 3,6 раза и достигли

1,17 млн шт. Основной причиной роста продаж послужило увеличение спроса на бензиновые генераторные установки малой мощности, которые пользуются спросом на Российском рынке. За пятилетний период продажи бензиновых генераторных установок увеличились в 3,7 раза, или на 791 тыс. шт. Бензиновые генераторные установки применяются для питания частных домом или на небольших предприятиях, в случае кратковременных перебоев подачи электроэнергии, для работы на строительных площадках, где нет электричества, для обеспечения автономной работы выездных ремонтных бригад. Наибольшей популярностью пользуются модели мощностью от 2 до 5 кВт как с ручным, так и с электростартером. Широкий диапазон сфер применения бензиновых генераторов, небольшие размеры, обеспечивающие удобство транспортировки, а также относительно невысокая стоимость обосновывают их широкое применение в современных реалиях [5]. Исследования, направленные на изучение электрогенераторных установок позволяют косвенно оценить потребность в устройствах мониторинга и защиты данных установок.

Материалы и методы.

В работе был выполнен анализ производства и продаж электрогенераторов в Российской Федерации, с целью обоснования разработки устройств мониторинга режимов работы маломощных электрогенераторов.

Результаты и обсуждение.

Анализ рынка электрогенераторных установок показал высокую динамику производства. Согласно данным маркетингового исследования «Рынок генераторов и генераторных установок в России с прогнозом по 2027 г.», проведенного маркетинговым агентством «Роиф Эксперт» в 2023 году, объем российского рынка генераторов и генераторных установок увеличился на 20%. Стоит учесть, что показатели объема отечественного производства являются самыми высокими за всю историю исследований, прогноз также предполагает дальнейшую положительную направленность. Объем рынка демонстрирует уверенный и стабильный рост, что говорит о развитии данной сферы производства [6]. Среди бензиновых генераторных установок на рынке можно встретить как отечественные бренды - Зубр, PATRIOT, так и импортные бренды - Huter, Electrolite, Denzel и другие [5].

Взрывной рост продаж видят в онлайн-магазинах: в "Яндекс.Маркете" количество соответствующих заказов увеличилось в 1,5 раза и в 2,5 раза соответственно. На «Ozon» увеличение продаж в мае составило 3,5 раза, на «Wildberries» - 3,3 раза. Наиболее популярными моделями становятся бензиновые генераторы. Чаще всего приобретают технику мощностью от 3 до 6 киловатт, поскольку это оптимальная мощность для обеспечения электропитания в загородном доме. Средняя цена бензогенератора, по данным пресс-службы "Авито", составляет 28 тысяч рублей [6,7].

С учетом экономической ситуации в России, санкционных ограничений и последствия адаптации экономики, а также поведения ряда иностранных компаний, ранее являющихся активными участниками российского рынка генераторных установок, не изменили традиционную структуру российского рынка электрогенераторов. Для рынка генераторных установок в РФ характерна высокая динамика и максимальный объем производства, увеличение спроса данных установок отражается и на стоимости электрогенераторов. Принципиальные тенденции рынка генераторов заключаются в существенном наращивании объемов импорта.

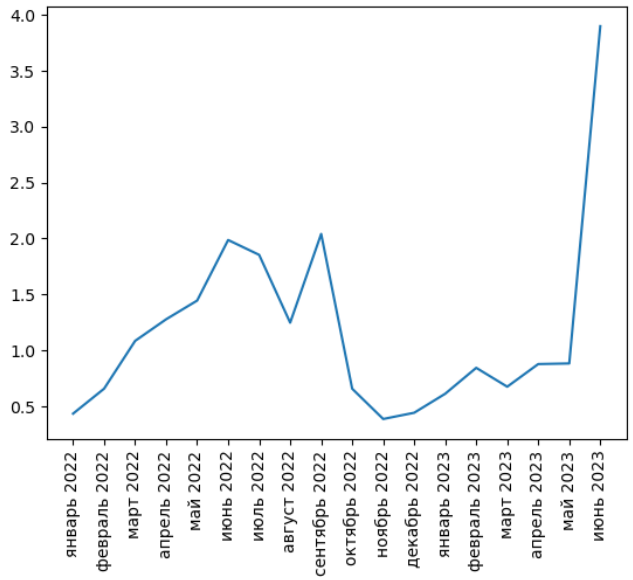


Рисунок 1 - Динамика внутреннего производства синхронных генераторов

При этом отмечается увеличение стоимости поставок из Китая и Турции, сокращение объемности поставок из Австрии, Германии и Соединенных Штатов Америки, наращивание доли экспорта генераторов и генераторных установок в Беларусь, достижение ценового максимума на продукцию.

Ценовые параметры на продукцию демонстрировали существенную корректировку. Наиболее высокий порядок цен наблюдается на поставку генераторов и генераторных установок по импортным контрактам с Соединенными Штатами Америки и Японией. Наименее – с Китаем и Беларусью [8]. В 2024 г в России было реализовано 1,2 тыс генераторов, что в 3,6 раз превысило продажи 2020 г. Доля китайских генераторов в совокупном импорте возросла до более 95%.

Таблица 1. Продажа генераторных установок в России в 2020-2024 гг. (тыс. шт.)

Параметр	2020	2021	2022	2023	2024
Продажи (тыс.шт.)	327,0	461,2	586,0	1012,2	1173,6
Динамика (% к предыдущему году)	-	41,0	27,1	72,7	15,9

По данным анализа рынка генераторных установок в России, подготовленного «BusinesStat», в 2020-2024 гг их продажи в стране ежегодно увеличивались. В 2024 году в стране было реализовано 1,2 тыс. генераторов, что в 3,6 раз превысило продажи 2020 года. На рынке преобладает импортная продукция, преимущественно поставляемая из Китая. При этом доля китайских генераторов в совокупном импорте возросла с 95% до 99% в 2020-2024 гг. Предлагаемая китайскими поставщиками продукция отличается более низкой ценой, что делает её привлекательной для широкого круга потребителей, особенно в условиях экономической нестабильности. Кроме того, китайские производители активно расширяют модельный ряд, предлагая генераторы различных мощностей и с разными типами двигателей, удовлетворяя потребности как частных лиц, так и промышленных предприятий.

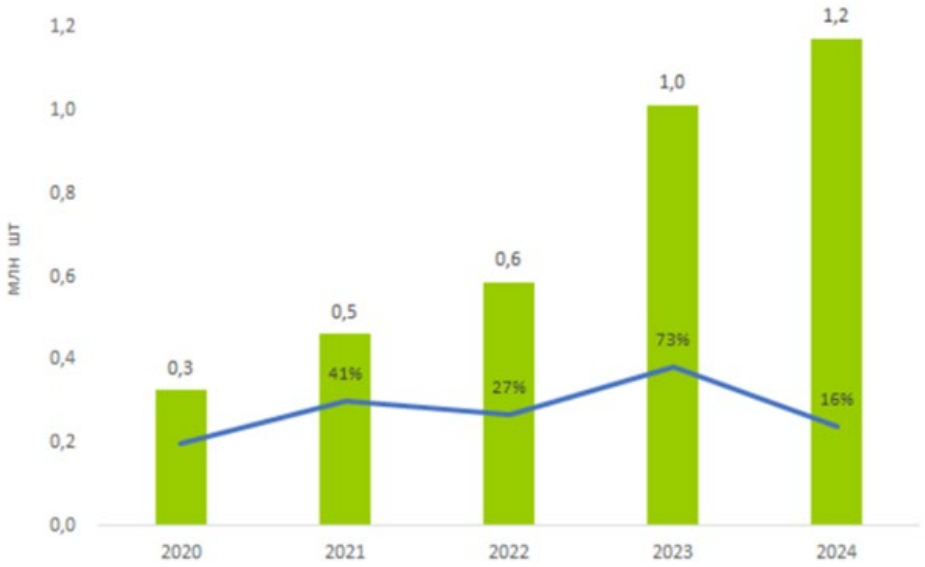


Рисунок 2 - Продажа генераторных установок в России в 2020-2024 гг. (тыс. шт.)

Отечественные производители занимают небольшую долю рынка генераторных установок. Однако растущая потребность в замещении импортных электрогенераторов служит значительным фактором для развития отечественного производства этих устройств. Помимо развития новых производств генераторных установок, на рынке отмечается модернизация и расширение существующих предприятий, что позволяет им наращивать производственные объемы. Ранее российская промышленность в основном была ориентирована на выпуск генераторных установок с дизельными двигателями, но в последнее время наблюдается рост числа компаний, производящих бензиновые электрогенераторы. Особое внимание также уделяется разработке генераторов, способных работать на различных видах топлива, включая альтернативные источники энергии [9].

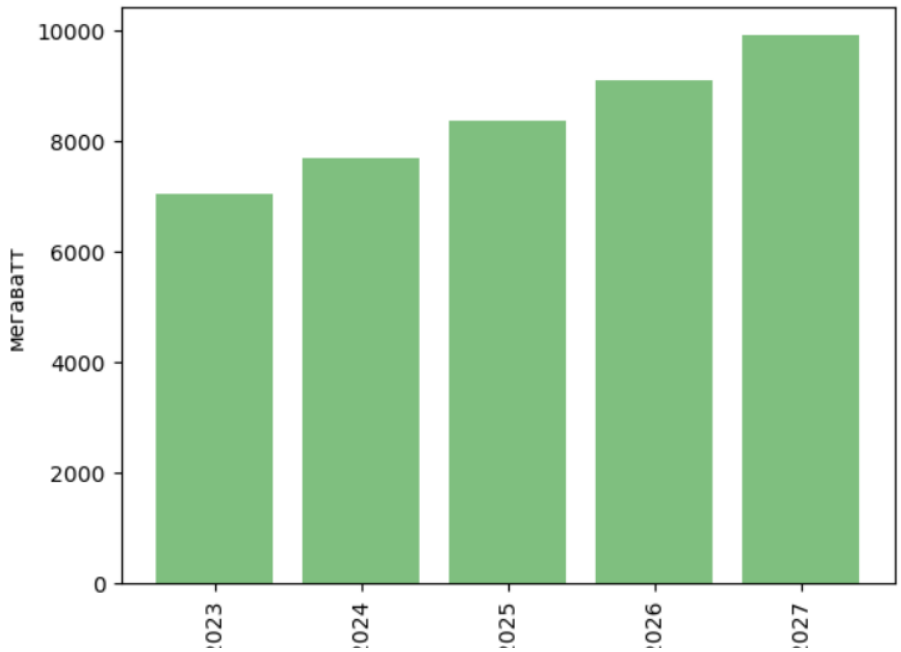


Рисунок 3 - Прогноз динамики российского рынка синхронных генераторов.

Вывод

Анализ рынка генераторного оборудования небольших мощностей имеет большое значение для вопросов электроснабжения сельского хозяйства. Это связано с приоритетными

областями применения таких установок – автономное, резервное электроснабжение сельских потребителей. Особенно важным является вопрос резервного электроснабжения частных домовладений и заметное увеличение закупок генераторов сельским населением. Основываясь на данные источников можно сделать вывод о том, что в настоящее время спрос на электрогенераторы неуклонно растёт. Актуальным являются исследования и разработка оборудования, предназначенного на повышение эффективности работы электрогенераторов.

Список использованных источников

1. АНАЛИЗ РЫНКА ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ В РОССИИ. Попрядухин Е.В., Крамской С.В., Панфилов А.А., Виноградов А.В. Агротехника и энергообеспечение. 2024. № 1 (42). С. 15-23.
2. Селиванов, К. В. Анализ способов малого распределенного электроснабжения / К. В. Селиванов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 1-4(55). – С.107-110. – DOI 10.23670/IRJ.2017.55.173. – EDN XRHHEL.
3. Воронцов, А. В. Оценка перспектив развития распределенной генерации России в рамках развития энергетики России / А. В. Воронцов // Вестник университета. – 2014. – № 14. – С. 115-120. – EDN TGWKCZ.
4. Ефимов, Н. Н. Перспективы развития малой распределенной энергетики / Н. Н.Ефимов, О. С. Попель, В. Н. Балтян // Известия высших учебных заведений. СевероКавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 1(182). – С. 60-64. – DOI 10.17213/0321-2653-2015-1-60-64. – EDN TKPEUL
5. Рынок генераторных установок 2021. Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://businesstat.ru/images/demo/generator_sets_russia_demo_businesstat.pdf
6. Обзор российского рынка синхронных генераторов. Июнь 2023. Прогноз развития до 2027 года. Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://dzen.ru/a/ZM0Aw4A6MSW8xcjk
7. Ритейлеры видят взрывной спрос на генераторы для частных домов Подмосковья. Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://realty.ria.ru/20250520/generatory-2017783750.html
8. Обзор рынка генераторов и генераторных установок (с товарными группами) в России фиксирует высокую + 20% динамику. Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://www.sostav.ru/blogs/32702/42345
9. В 2024 г в России было реализовано 1,2 тыс генераторов, что в 3,6 раз превысило продажи 2020 г. Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: https://marketing.rbc.ru/articles/15915/

Евгений Владимирович Попрядухин, студент 1 курса магистратуры факультета «Агротехники и энергообеспечения» направления подготовки 13.04.02. «Электроэнергетика и электротехника», Орловский ГАУ, popryaduhinzhenya@mail.ru

ANALYSIS OF THE RUSSIAN ELECTRIC GENERATOR MARKET

E.V. Popryadukhin

N.V. Parakhin Oryol State Agrarian University

Abstract. Gasoline and diesel generators of various types and capacities offer numerous options for powering rural areas. The main applications of these units include autonomous and backup power supplies for private homes and villages, as well as small commercial and agricultural facilities. An analysis of the rural electric generator market demonstrates steady growth. Production of these units in Russia has shown significant positive growth over the past five years. There are also trends toward increased localization of production and expansion of applications. A study of the design features of this equipment and practical experience with its operation allows us to identify promising areas for scientific and technical development. Research aimed at improving the energy efficiency, reliability, and safety of electric generators, their applications, identifying the causes of malfunctions, and developing recommendations for improving the efficiency of this equipment is currently underway. Key words: rural power grids, reliability of power supply, small generation, analysis, market, production.

Evgeny Vladimirovich Popryadukhin, 1st year Master's student at the Faculty of Agricultural Engineering and Energy Supply, training area 04/13/02. "Electric Power Engineering and Electrical Engineering", Oryol State Agrarian University, popryaduhinzhenya@mail.ru

УДК 62-665.9

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И КОРО-ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ АПК

Е.Б. Жуков, А.В. Капишников

АлтГТУ им. И.И. Ползунова

Аннотация: *Повышение энергетической эффективности Агропромышленного комплекса, как и коммунальной энергетики РФ в целом, на сегодняшний день невозможно без внедрения полностью автоматизированных котельных установок с современными технологиями сжигания твёрдого топлива. В настоящей работе реализовано исследование теплотворной способности топливной смеси из бурого угля и рапсовой лузги, а также приведён сравнительный анализ с бурым углем Орловского месторождения. Выявлены перспективы использования отходов сельхоз предприятий в качестве топлива и использование их в котлах с ретортной топкой и в топках с вихревой камерой сгорания, приведён принцип работы водогрейного котла с вихревым дожиганием, работающего на КДО и смеси Бурого угля и КДО.*

Ключевые слова*: лузга, коро-древесные отходы, сжигание, экология, ретортная горелка, водогрейный котёл, вихревая топочная камера.*

Введение.

Коммунальный сектор Сибирского Федерального Округа и восточной части Российской Федерации представлен водогрейными котлами тепловой мощностью от 0,3 МВт до 20,0 МВт, работающими на твёрдом топливе. Котельные агрегаты до 1,0 МВт по большей части имеют ручной заброс угля и ручное шлакоудаление. Опыт работы с подобными котельными привёл авторов к категорическому выводу о том, что повысить надежность эксплуатации котла, выдержать все необходимые современные требования к экологическим и экономическим показателям энергетического оборудования, возможно только в случае полного ухода от ручного труда в пользу полной автоматизации топочного процесса.

Современные тенденции развития энергетической отрасли АПК диктуют необходимость повышения экологических и экономических показателей котельных агрегатов. Основным критерием оценки экономичности работы любого котла являются его затраты на топливо. Перспективным направлением повышения экономических показателей котельных установок малой и средней мощности становится вовлечение в топливный баланс предприятий АПК различных биотоплив, включая совместное сжигание угля и сельхозотходов, а также угля и коро-древесных отходов (КДО).

Цель работы.

Применяемые на твёрдотопливных котельных АПК, угли имеют очень плохие теплотехнические показатели, - высокая влажность и разрозненный фракционный состав не позволяют эффективно организовать топочный процесс. А низкая культура эксплуатации котлов с ручными топками, зачастую абсолютно неквалифицированным персоналом приводит к тому, предприятия постоянно сталкиваются с колоссальным перерасходом топлива и штрафами за вредные выбросы.

Решением данных проблем может быть переход на топлива органического

происхождения, и на полностью автоматизированный топочный процесс. К таким топливам можно отнести отходы сельскохозяйственных предприятий (лузга пшеницы, овса, ячменя, гречихи, подсолнечника) и отходы лесозаготовительных хозяйств (хвоя, листва, мелкие ветки, кора) [7].

Результаты исследования:

В топливной лаборатории кафедры Котло- и реакторостроения Алтайского Государственного Технического Университета им. И.И. Ползунова было проведено исследование образцов, предоставленных КХ Апасова Н.И. Среди образцов, предоставленных крестьянским хозяйством, особое внимание привлекли отходы в виде рапсовой лузги, имеющих наибольшее количество среди остальных отходов. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица-1. Результаты исследования рапсовой лузги.

Наименование показателя, обозначения, единица измерения	Результат	Точность (сходимость)	
		Фактически	По ГОСТ не более
Влажность аналитической пробы W^a, %	13.6	0,07 % абс.	0,15 % абс.
Зольность сухой массы A^d, %	11.3	0,1 % отн.	2,00 % отн.
Зольность рабочей массы A^r, %	11.3		
Содержание горючих веществ в сухой массе пробы Г, %	88.7	0,01 % отн.	2,00 % отн.
Выход летучих веществ из сухой беззольной массы V^{daf}, %	84.7	0,1 % отн.	3,00 % отн.
Высшая теплота сгорания сухой беззольной массы Q^{daf}, кДж/кг(ккал/кг)	19536 (4666)	ΔQ_s^d=10 кДж/кг	85 кДж/кг
Низшая теплота сгорания рабочего топлива Q^r_i, кДж/кг(ккал/кг)	15145 (3617)		

Полученные результаты показывают, что рапсовая лузга обладает не высокой влажностью - не более 14 %. Не высокое содержание влаги в топливе способствует значительному увеличению реакционной способности топлива, и уменьшению потерь тепла с уходящими газами, и увеличению низшей теплоты сгорания. Так же рапсовая лузга обладает не высокой зольностью не более 12 %. Низшая теплота сгорания составила ***16 781 кДж/кг***, что превосходит теплоту сгорания Орловского бурого угля 2Б; Р (***11350 кДж/кг)***[4,5].

Таким образом, рапсовая лузга представляет собой классический пример низколиквидного побочного продукта агропромышленного комплекса, что актуализирует поиск и разработку эффективных технологий его применения. Перспективным направлением является энергетическое использование. Наиболее обоснованной методикой представляется совместное сжигание рапсовой лузги с низкокачественными бурыми углями. Рапсовая лузга, обладающая легкой воспламеняемостью, выступает в роли эффективного модификатора традиционного твердого топлива. Её добавление обеспечивает интенсивный розжиг угольной массы и стабилизирует процесс горения основной угольной фракции.[1]

Для опыта была установлена пропорция смеси: 30% рапсовой лузги, 70% бурого

угля, низшая теплота сгорания которого составляет 11913 кДж/кг.

В ходе данного исследования были получены следующие характеристики топливной смеси:

Таблица-2. Результаты исследования топливной смеси.

Наименование показателя, обозначения, единица измерения	Результат	Точность (сходимость)	
		Фактически	По ГОСТ не более
Влажность аналитической пробы W^a, %	6.7	0,07 % абс.	0,15 % абс.
Зольность сухой массы A^d, %	27.8	0,1 % отн.	2,00 % отн.
Зольность рабочей массы A^r, %	27.8		
Содержание горючих веществ в сухой массе пробы Г, %	72.2	0,01 % отн.	2,00 % отн.
Выход летучих веществ из сухой беззольной массы V^{daf}, %	53.9	0,1 % отн.	3,00 % отн.
Высшая теплота сгорания сухой беззольной массы Q^{daf}, кДж/кг(ккал/кг)	27110 (6475)	ΔQ_s^d=10 кДж/кг	85 кДж/кг
Низшая теплота сгорания рабочего топлива Q^r_i, кДж/кг(ккал/кг)	18481 (4414)		

Переход на полностью автоматизированный водогрейный котёл с ретортной топкой позволит эффективно организовать топочный процесс и решить проблемы с перерасходом топлива и вредных выбросов.

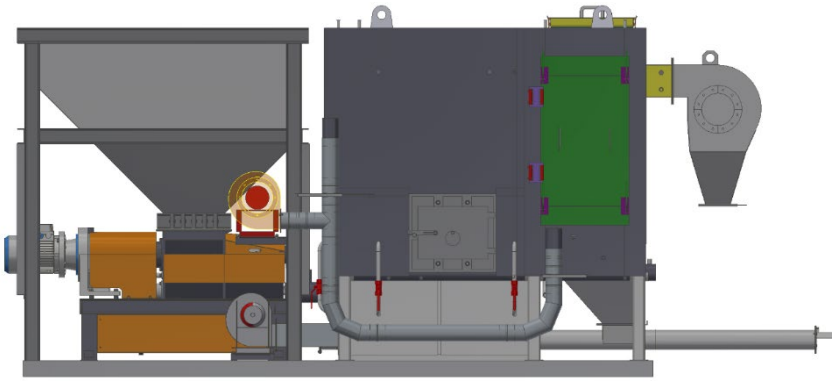


Рисунок 1 – Полностью автоматизированный водогрейный котёл тепловой мощностью 600 кВт с ретортной топкой

За более чем 20-летний период работы, были существенно модернизированы и внедрены в производство линейки различных механизированных топочных устройств устанавливаемых под блоки паровых и водогрейных котлов.

Традиционные технологии сжигания нефракционированных низкокалорийных углей и смесей с сельскохозяйственными отходами и КДО, существующие на данный момент в малой энергетике, имеют достаточно большие недостатки, не позволяющие обеспечить высокие экономические показатели работы котельных установок. Проблему представляет собой именно классическое слоевое сжигание в топочных устройствах котельных агрегатов каменных и бурых углей класса Р (рядовой). Связано это со сложностью удержания коксовых частиц выгорающего топлива внутри топочной камеры до их полного выгорания, и с вероятностью образования золовых отложений на выходе топочной камеры и в

конвективных поверхностях нагрева. Не механизированный топочный процесс приводит к неравномерному по времени циклу работы котла, от максимальной пиковой его мощности, до снижения нагрузки до 30% от номинала. При такой работе, возникает опасность пожаров в газоходах и золоуловителях котельного агрегата, по мере накопления в них недожога, по причине большого выноса недогоревших коксовых частиц из топочной камеры котла [6].

В данной статье предлагается для разных диапазонов мощностей котельных установок использовать разные технологии подачи топлива в котел и разные технологии его сжигания.

Для котельных агрегатов мощностью 200 кВт ÷ 1000 кВт предлагается использование ретортной топочной камеры (см. рис.1), в которой подача осуществляется при помощи шнека в выгружной лоток, в котором горение происходит не по противоточной схеме, как это реализовано в большинстве классических слоевых топочных устройствах, а по прямоточной схеме, когда и топливо и воздух для горения подаются снизу вверх (см. рис.2).

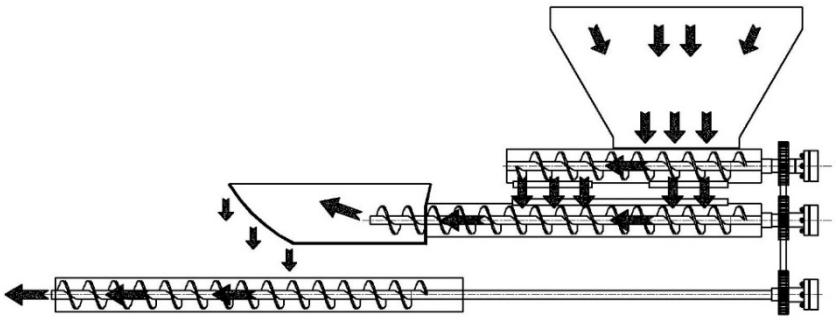


Рисунок 2 – Принципиальная схема работы устройства для подачи твёрдого топлива в топку котла

Конструкция полностью автоматизированного котла, представленного на рисунке 1, имеет устройство подачи сырого топлива, состоящее из приёмной воронки для топлива, механизма шнековой подачи, включающего дробящий шнек, выводной шнек, решётку-дозатор, приводной механизм с механическим редуктором (патент № RU 2 786 841 C1). Внизу под рабочей частью дробящего шнека расположена решётка-дозатор, выполняющая сепарационные и дробильные функции (рис.3).

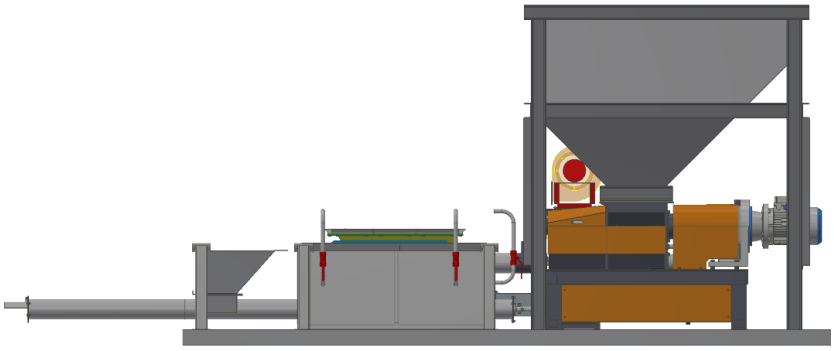


Рисунок 3 – Устройство для механизированной подачи топлива в котел

Во время проведения опытно-промышленных испытаний было установлено, что дробление нефракционированного топлива происходит в момент взаимодействия лопастей дробящего шнека, топлива и решётки-дозатора. За счёт трения между лопастями шнека, решёткой-дозатором топливо измельчается до необходимых для наилучшего выгорания размеров и проходит через специальные отверстия решётки-дозатора системы подачи топлива.

Для мощностей от 1000 кВт до 6000 кВт предлагаются котельные агрегаты с высокосепарационной топочной камерой, которая позволяет удерживать частицы

недогоревшего кокса топлива до их полного выгорания. Такие топки с многократной циркуляцией полифракционного топлива (рис.4), разработаны специально для сжигания бурых углей и коро-древесных отходов (КДО), как в смеси, так и по отдельности.

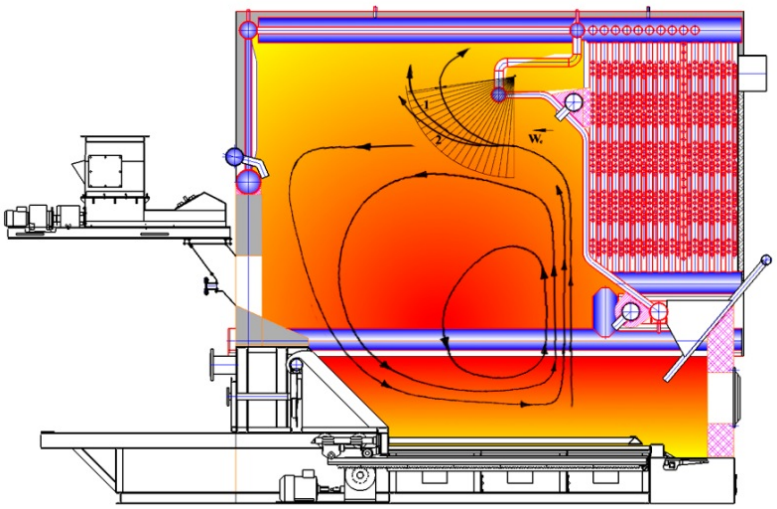


Рисунок 4 – Водогрейный котел с вихревым дожиганием, работающий на КДО и смеси Бурого угля и КДО

Главная конструктивная особенность таких топок – специальный профиль, в котором частицы разрозненного фракционного состава, обладающие при этом низкой плотностью, что характерно для бурых углей, КДО и сельхозотходов, удерживаются внутри камеры сгорания после выхода летучих. Это происходит за счет инерционного принципа сепарации.

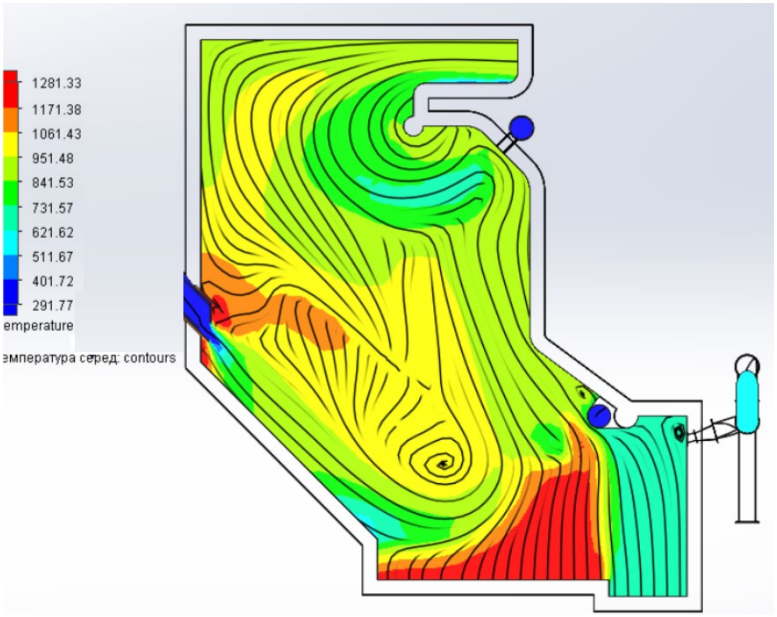


Рисунок 5 – Результаты CFD моделирования, течений внутри топочной камеры сжигающей смеси Бурого угля, КДО и сельхозотходы

Выводы

Данные технические решения позволили успешно использовать предложенные технологические схемы топочных устройств для применения топлив существенно различных по вещественному и фракционному составу. Результаты натурных экспериментов и CFD-численного моделирования (рис.5) по сжиганию таких топлив [2, 3] показали возможность их эффективного применения в котлах малой и средней мощности. Представленные, учеными АлтГТУ им. И.И. Ползунова и инженерами компании ООО «Барнаулэнергомаш», разработки котельных агрегатов с высокими экологическими показателями с применением

многократной циркуляции и ретортной подачей топлива предлагаются к широкому внедрению в энергетические объекты агропромышленного комплекса РФ, что позволит рационально использовать низкосортный нефракционированный уголь или органические отходы лесных и сельскохозяйственных производств.

Список использованных источников:

1. Фурсов И.Д., Жуков Е.Б.,.Гаврин Н.С, Меняев К.В. ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В КОТЛАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ /. Сборник статей I Международной заочной научно-практической конференции "Проблемы техносферной безопасности -2015" (10 февраля 2015г.); Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015 - с.206-209.
2. Zhukov E.B., CO-COMBUSTION TECHNOLOGY OF COAL AND WOOD WASTE/Zhukov E.B., Puzirev E.M., Menyaev K.V.The 8th International Symposium on Coal Combustion (8thISCC) Beijing, China, July 19-22, 2015
3. Пузырев Е.М., Жуков Е.Б., Паутова Е.Е., Меняев К.В., Технология совместного сжигания бурого угля и кородревесных отходов в энергетических котлах / ОАО "ВТИ", Москва, 28-29 июня 2016 г. Сборник до-кладов III международной научно-практической конференции "Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла", стр. 114-121"
4. Меняев К.В., Методы испытания углей: учебное пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014 – 63с.
5. Жуков Е.Б., Меняев К.В. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине “Физико-химические свойства подготовка к сжиганию органических топлив” для студентов направления 141100 «Энергетическое машиностроение» /Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Издательство АлтГТУ, 2013 – с.60.
6. Фурсов И. Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: учебное пособие /И. Д. Фурсов; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – 4-е изд. перераб. и доп. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016 – 297 с.
7. Наталья Баклыгина, Энергия из отходов. Энергетическая утилизация отходов [Электронный ресурс]: инф. журн. / Баклыгина Н. – Электрон. текстовые дан. – Москва [б.и.], 2018 – Режим доступа: https://1-engineer.ru/energiya-iz-othodov-energeticheskaya-utilizaciya-othodov/, свободный.

Bibliography:

1. Fursov I.D., Zhukov E.B., Gavrin N.S., Menyaev K.V. TECHNOLOGY OF WOOD WASTE INCINERATION IN BOILERS OF SMALL AND MEDIUM CAPACITY. Collection of articles of the I International Correspondence scientific and practical Conference "Problems of technosphere safety -2015" (February 10, 2015); Alt.State Technical UniversityI.I.Polzunov University. Barnaul: Publishing House of AltGTU, 2015 - pp.206-209.
2. Zhukov E.B., CO-COMBUSTION TECHNOLOGY OF COAL AND WOOD WASTE/Zhukov E.B., Puzirev E.M., Menyaev K.V.The 8th International Symposium on Coal Combustion (8thISCC) Beijing, China, July 19-22, 2015
3. Puzyrev E.M., Zhukov E.B., Pautova E.E., Menyaev K.V., Technology of joint combustion of brown coal and crusty wood waste in power boilers / JSC "VTI", Moscow, June 28-29, 2016. Proceedings of the III International scientific and practical conference "The use of solid

fuels for efficient and environmentally friendly electricity and heat production", pp. 114-121"

4. Menyaev K.V., Coal testing methods: a textbook / Alt. State Technical University. I.I. Polzunov University. Barnaul: Publishing house of AltGTU, 2014 – 63s.

5. Zhukov E.B., Menyaev K.V. Methodological guidelines for laboratory work in the discipline "Physico-chemical properties preparation for the combustion of organic fuels" for students of the direction 141100 "Energy engineering" / Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Barnaul: AltSTU Publishing House, 2013 – p. 60.

6. Fursov I. D. Design and thermal calculation of steam boilers: a textbook /I. D. Fursov; Alt. State Technical University. I. I. Polzunov University. – 4th ed. reprint. and dop. – Barnaul : Publishing house of AltGTU, 2016 - 297 p.

7. Natalia Baklygina, Energy from waste. Energy waste management [Electronic resource]: inf. journal / Baklygina N. – Electron. text data. – Moscow [B.I.], 2018 – Access mode: https://1-engineer.ru/energiya-iz-othodov-energeticheskaya-utilizaciya-othodov /, free.

Капишников Артем Витальевич, магистр, ст. преподаватель, аспирант АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 656000, г. Барнаул, timon-zarj@yandex.ru
Жуков Евгений Борисович, к.т.н., доцент, Заведующий кафедрой АлтГТУ им. И.И.Ползунова, 656000, г. Барнаул, jukov23j@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» (АлтГТУ)»

BOILER UNITS FOR BURNING AGRICULTURAL AND BARK-AND-WOOD WASTE IN THE AGRO-INDUSTRIAL POWER SECTOR

E.B. Zhukov, A.V. Kapishnikov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov"

Abstract: Improving the energy efficiency of the agro-industrial complex, as well as the public energy sector in the Russian Federation as a whole, is currently impossible without the implementation of fully automated boiler units with modern solid fuel combustion technologies. This paper examines the calorific value of a fuel mixture of brown coal and rapeseed husks, and provides a comparative analysis with brown coal from the Orlovskoye deposit. The paper identifies the potential for using agricultural waste as fuel and its use in retort furnace boilers and swirl-combustion furnaces. The operating principle of a hot water boiler with swirl-combustion afterburning, fueled by BWW and a mixture of brown coal and BWW, is presented.

Key words: husk, bark and wood waste, combustion, ecology, retort burner, hot water boiler, vortex combustion chamber.

Artem Vitalievich Kapishnikov, Master's Degree, Senior Lecturer, Postgraduate Student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 656000, Barnaul, timon-zarj@yandex.ru
Evgeny Borisovich Zhukov, PhD, Associate Professor, Head of Department, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 656000, Barnaul, jukov23j@yandex.ru
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov" (Altai State Technical University)

УДК 620.9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ РЕСУРСНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЮГО-ВОСТОЧНЫХ КАРАКУМАХ

Ахмет Пенджиев[1], Непес Астанов[2]

[1] Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
[2] Туркменский государственный педагогический институт им. С.Сейди

Аннотация. Актуальность проблемы *является освоения пустыни Каракум, которая занимает 80% земельных ресурсов Туркменистана.*

Целью исследования *- энергообеспечения пустынные регионы Каракум с использования солнечно-энергетических технологии и установок.*

Задачей исследования *– определить солнечно-энергетические ресурсные потенциалы с применением инновационных методик расчета при разработке, создания и внедрения эффективных солнечных энергетических технологии и установок.*

Методика. *Для определения валового, технического, экономического и экологического потенциала учтены природно-климатические условия Юго-восточных Каракум.*

Методология исследования *– использованы метеорологические данные, обработаны физическими законами и математическими методами расчета для фотоэлектрических преобразователей.*

Результаты исследования*. Оценены теоретические и методические расчеты валовых, технических, экономических и экологических потенциалов солнечной энергии, определены энергоэффективность солнечного излучения и рассчитаны оптимальные уколы наклона солнечных коллектора для Юго-восточных Каракум.*

Обсуждение и заключение. *В результате исследовании получены ресурсные потенциалы солнечной энергии, преобразованные в электрическую энергию,: валовый - 1895,9 кВт·ч/(м^2·год); технический - 248,55 кВт·ч/(м^2·год); экономия топлива - 99,44 кг у.т./(м^2·год); экологические потенциалы, CO_2, - 158,98 кг/год. Наиболее эффективным для использование солнечных коллектора в Юго-Восточных Каракумах по месяцам года с углом наклона является: 60 градусов - январь, февраль, ноябрь, декабрь; 45^o - март, октябрь; 30^o - с апреля по сентябрь.*

Ключевые слова*: валовый, технический, экономические, экологические потенциалы, солнечная энергия, Каракумы, Туркменистан*

Введение. На современном этапе научно-технического развития современный Туркменистан – динамично развивающееся государство, обладающий богатейшим природными ресурсами, инфраструктурными и человеческими потенциалами. Задачи устойчивого развитию экономики Туркменистана основаны на использовании современных и инновационных технологии во всех структурах АПК [1,2].

Восемьдесят процентов территорий Туркменистана занимает пустыня Каракумы и проблема освоения и борьбы с опустыниванием является одной важнейших проблемой страны. Решения проблемы энерговодообеспечение для освоения пустыни и развития пастбищного животноводства может сыграть использования солнечно-энергетических технологии. Протягивания линий электропередачи (ЛЭП) из-за низкой плотности населения

и дороговизны экономический не целесообразно.

Вопрос вод обеспечения территорий частично может решить использование подземные воды пустыни, объем которой составляет 80 км^3, но они находятся на различных глубинах от 5 до 300 м и различной минерализацией [2].

Вопрос подъема воды из этих глубин можно с использованием солнечных водоподъёмных установок. Солнечно-энергетические ресурсы составляют по территорий страны $4 \cdot 10^{15}$ кДж, или в эквиваленте $1{,}4 \cdot 10^{9}$ т у.т. в год [3,6,12].

Для разработки, создания, внедрения инновационных солнечных энергетических систем и технологии в пустынной зоне Каракум необходимо комплекс теоретических, экспериментальных исследований всех технический составляющих компонентов энергоустановки, определить оптимальные конструктивные особенности и предельную энергетическую мощность системы. Для строительство и ввода в действий солнечных энергетических систем и технологии необходимо составления технико-экономического обоснования (ТЭО). Существующие инженерные расчеты не достаточной точны при расчетах ТЭО в пустынной зоне Туркменистана, поэтому решение этих проблем, является весьма актуальной [1-4,6,8,12].

Степень разработанности темы. Туркменскими учеными проделаны и достигнуты большие успехи в научно-исследовательской работе (НИР) по использованию солнечной энергии. В современном мире всё возрастает требования к качеству энергетических установок, созданию новых прогрессивных энергоэффективных конструкций, в соответствии со стратегией устойчивого развития Туркменистана до 2030 г. и Закона о возобновляемых источниках энергии. Поэтому следует трактовать и научные основы прогрессивного проектирования, конструирования и технологического развития солнечной энергетики. Научной основой современного и перспективного солнечной энергетики является комплекс теоретических, расчётно-аналитических и экспериментальных исследований. Они базируется на общих принципах фундаментальной науки и научных основах инновационной техники и технологии, которые имеют свою конечной целью решение конкретных производственных задач при изготовлений солнечно-энергоустановок в пустынной зоне Каракумы[3,6-8,13].

Для выполнения выше названных требований в работе рассмотрены и использованы инновационные методики, технологии, научно-обоснованы, систематизированы и теоретический, практический и экспериментально исследованы ресурсные валовые, технические, экономические и экологические потенциалы с учетом природно-климатических условий для освоения Юго-Восточной пустынной зоне Каракумы [1,2].

В статье приведены теоретические и методические расчеты валовых, технических, экономических и экологических потенциалов солнечной энергии, определены эффективность энергетического потока солнечного излучения и угол наклона солнечных коллектора для Юго-Восточных Каракум.

Юго-Восточные Каракумы представляется как совокупность участков, или зон, в каждой из которых интенсивность поступающего солнечного излучения и альбедо Земли, а также географические, климатические и погодные условия являются однородными по всей площади зоны дельта Амударьи имеет линейную протяженность более 500 км [1-3,9,13].

Методика и методология определения. Для определения валового, технического, экономического и экологического потенциалов Юго-Восточных Каракум учтены не неблагоприятные природно-климатические условия и атмосферные явления в течение года: среднемноголетний приход солнечной энергии на единицу площади, кВт·ч/(м^2·год); среднемноголетний приход солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в і-й

месяц года, кВт·ч/(м^2·мес.); среднемноголетний приход прямого потока солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в i-й месяц года, кВт·ч/(м^2·мес.); среднемноголетний приход рассеянной солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в i-й месяц года при безоблачном небе, кВт·ч/(м^2·мес.); эмпирическая продолжительность солнечного сияния для данной местности в течение i-го месяца, ч/год; астрономическая возможная продолжительность солнечного сияния для данной местности в i-й месяц, ч/год [3,7-9,13]. Эти условия и явления непосредственно влияют на энергопроизводительность, анализ приведены в таблице 1 [6,7,9,10].

Таблица 1 - Неблагоприятные природно-климатические условия и атмосферные явления при использований солнечных энергетических технологи и установок в Юго-Восточных Каракумах

Градиент неблаго-приятных дней	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Снег	4	2,5	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	2	10
Метели	0,07	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0,26
Туманы	5	2	1	0,3	0,1	-	-	-	0,1	0,3	1	5	14,8
Гроза	-	-	0,1	1	2	2	0,7	0,7	0,4	0,2	0,02	-	7
Град	-	0,2	-	0,1	0,04	0,04	-	-	0,02	-	-	0,02	0,42
Пыльные бури	0,4	0,8	1,8	2,9	2,0	2,4	1,9	1,6	1,0	1,0	0,4	0,1	16
Сильные ветра	3,5	4,1	4,4	2,5	2,1	0,9	0,8	0,7	0,1	0,5	1,3	1,9	23
Ясные дни Общая нижняя	4,8 15,6	5,1 16,3	4,5 16,9	6,2 20,6	13,1 26,6	24,0 29,1	26,2 20,6	28,5 30,8	27,0 29,8	19,1 28,3	11,2 22,9	7,4 17,9	177 285
Пасмурные дни Общая Нижняя	10,0 4,1	7,5 1,5	10,4 2,6	7,4 0,9	2,8 0,2	0,4 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0	1,1 0,0	4,1 0,7	9,1 3,2	53 13
Без солнца	7	4	4	2	0	0	0	0	0	0	4	6	27
Продолжительность солнечного сияния (час)	129	144	182	240	321	380	397	367	319	276	177	134	3066
Осадки в виде дождя (мм): ≥0,1 ≥0,5 ≥1,0 ≥5,0 ≥10,0	7,4 6,7 5,0 2,0 0,8 0,2	6,7 5,8 4,8 1,8 0,7 0,0	7,7 6,7 5,8 2,7 1,2 0,2	6,0 5,2 4,6 1,9 0,7 0,3	2,8 2,2 1,7 0,6 0,2 0,0	0,3 0,2 0,2 0,07 0,0	0,07 0,04 0,04	0,01 0,01 0,00	0,1 0,03 0,03 0,0	1,4 1,2 1,0 0,3 0,06	3,5 2,9 2,5 1,0 0,4 0,0	6,1 4,9 4,2 1,5 0,5 0,0	42 35 30 12 5 0,9

≥20 ≥30	0,04	80,03	0,01	0,07	30,00	0 0,0 0 0,0 0	0,0 0 0,0 0 0,0 0 0,0 0	0,0 0 0,0 0 0,0 0 0,0 0	1 0,0 0 0,0 0 0,0 0	0,0 0 0,0 0	30,00	4 0,0 3	0,2

1.Методика определения валового потенциала солнечной энергии

Валовый потенциал солнечной энергии региона – это среднемноголетняя суммарная солнечная энергия, падающая на площадь Юго-Восточных Каракум в течение одного года.

Регион представляется как совокупность участков, или зон, в каждой из которых интенсивность поступающего солнечного излучения и альбедо Земли, а также географические, климатические и погодные условия являются однородными по всей площади зоны. Количество зон в регионе, их положения и площади фиксируются в таблице [8,10,13].

В соответствии с определением валового потенциала по формуле необходимо получение данных по месячному приходу солнечной энергии на горизонтальную поверхность E_i (i=1, 2, …, 12).

Рассчитанные данные вносятся в таблицу значения, которых E_i течение года по месяцам i=1–12.

Средний параметр угла наклона прямого солнечного излучения к нормали ‹cos θ› и месячный приход прямой солнечной энергии на нормально ориентированную поверхность за 10 часов (с 7 до 17 ч) [3,6].

$$E_{OPi} = \frac{E_{\Pi i}}{\langle \cos\theta \rangle} = \frac{(1-\varepsilon)E_i}{\langle \cos\theta \rangle} = 2187{,}95 \text{ кВт·ч/(м}^2\text{·мес.)}, \quad (1)$$

где E_{Oi}, кВт·ч/(м^2·мес.), – среднемноголетний приход солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в i-й месяц года при безоблачном небе; $E_{\Pi i}$, кВт·ч/(м^2·мес.), – среднемноголетний приход прямого потока солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в i-й месяц года; E_i, кВт·ч/(м^2· мес.), – среднемноголетний приход солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в i-й месяц года; ε- коэффициент излучения [4,6-8,10,13].

Суммарное поступление солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в год за 10 часов в сутки (7-17 ч), E, оказывается равным

$$E = \sum_i E_i = 1895{,}9 \text{ кВт·ч/(м}^2\text{·год)}, \quad (2)$$

а валовый потенциал Северных Каракум на квадратный метр равен

$$W_B = ES = 1844{,}6 \cdot \text{S кВт·ч/год}, \quad (3)$$

где S, м^2, - площадь.

2. Методика определения технического потенциала солнечной энергии региона

Технический потенциал солнечной энергии региона – это среднемноголетняя суммарная энергия, которая может быть получена для региона от солнечного излучения в течение одного года при современном уровне развития науки и техники и соблюдении экологических норм.

Технический потенциал солнечной энергии представляет сумму технических потенциалов тепловой энергии и электрической энергии, получаемых соответствующим преобразованием солнечного излучения [6-10,13,15,16].

Технический потенциал электроэнергии от солнечного излучения. Исходные данные: $к_{Ф=}1\text{-}к_Т$; значения параметров фотоэлектрических солнечных батарей, характеризующие современный технический уровень: $\alpha=0{,}97$; $\eta_1=0{,}13$; $\chi=0{,}004$ $К^{-1}$; $T_1=298$ К; $\langle\lambda\rangle=40$ Вт/(м^2·К) [4,11,13].

Рассчитанные значения среднемесячной рабочей температуры T_i,

$$T_i = \frac{\frac{E_i}{t_{Pi}}\left[\alpha - \eta_1\left(1+\chi T_1\right)\right] + \langle\lambda\rangle T_{Oi}}{\langle\lambda\rangle - \frac{E_i}{t_{Pi}}\eta_1\chi}, \tag{4}$$

с использованием значений T_{Oi},E_i. Рассчитанные значения месячных технических потенциалов, приходящихся на единицу отводимой площади,

$$\frac{W_{T\Phi i}}{S_\Phi} = E_i\eta_1\left[1-\chi\left(T_i - T_1\right)\right], \quad =248{,}55 \text{ кВт·ч/год} \tag{5}$$

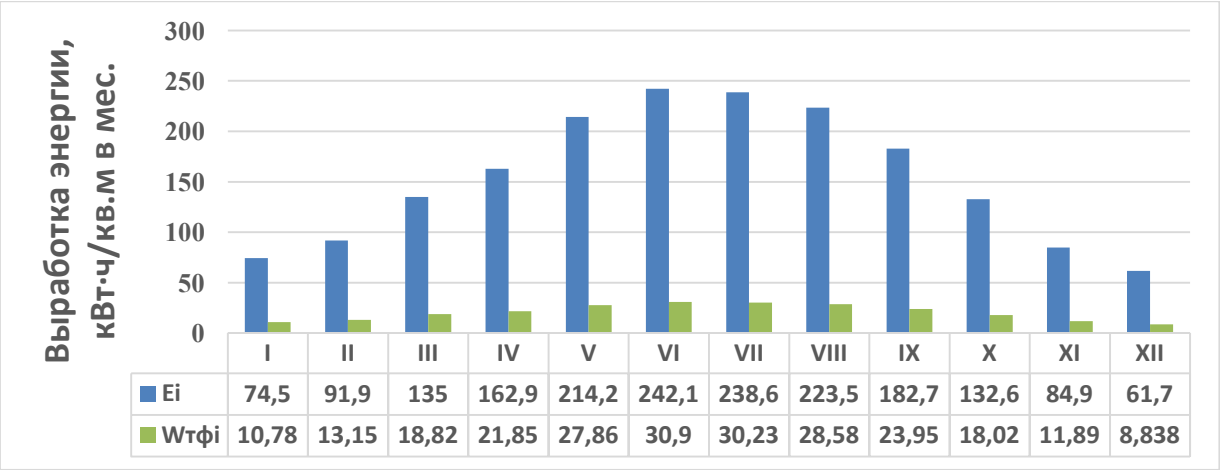
где $S_Ф=k_Ф\cdot q\cdot S$, м^2 , – площадь, отводимая под солнечные фотоэлектрические установки [10,11,13].

Суммированием по всем определяется потенциал $W_{TФ}$:

$$W_{TФ} = 248{,}55\cdot S_Ф, \text{ кВт·ч/год}, \tag{6}$$

3.Методика определения экономического потенциала солнечной энергии региона

Экономический потенциал солнечной энергии региона – это величина годовой выработки тепловой и электрической энергии в регионе от солнечного излучения, получение которой экономически оправдано для региона при существующем уровне цен на энергии, получаемую от традиционных источников, и соблюдении экологических норм [5,8-10,13].



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ei	74,5	91,9	135	162,9	214,2	242,1	238,6	223,5	182,7	132,6	84,9	61,7
Wтфi	10,78	13,15	18,82	21,85	27,86	30,9	30,23	28,58	23,95	18,02	11,89	8,838

Рисунок 1– Гистограмма энергетического показателей валового (Ei), технических потенциалов преобразованную в электрическую энергию (Wтфi) в течение года в Юго-Восточных Каракум

Определение экономического потенциала электроэнергии от солнечного излучения. Расчет экономического потенциала электроэнергии производится аналогично как и в вышеизложенном варианте.

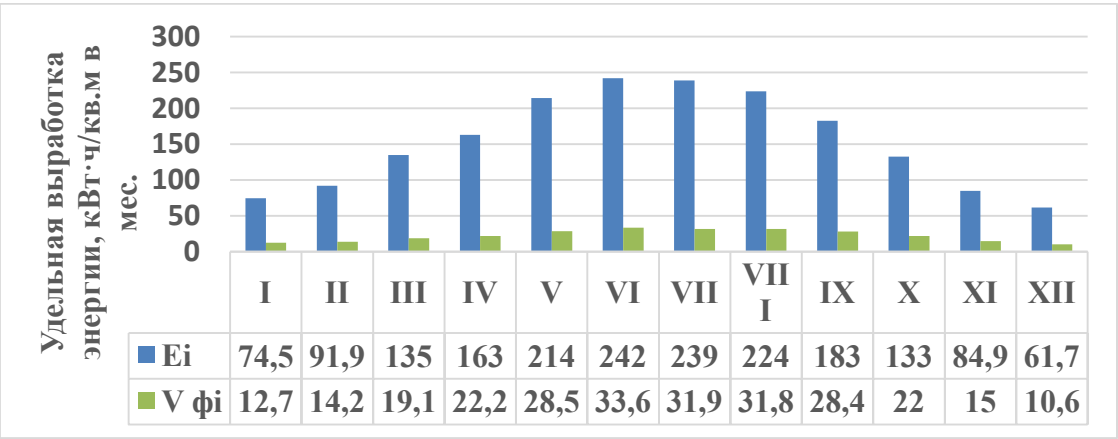
Экономический потенциал *i*-го месяца определяется выражением:

$$V_{фi} = E_{фi}\eta_1\left[1-\chi\left(T_i - T_1\right)\right] = 270{,}25 \text{ кВт·ч/(м}^2\text{·год).} \quad (8)$$

где: $V_{Фi}$, кВт·ч/(м^2·мес.), – объем выработки энергии единицей площади солнечной батареи в *i*-й месяц равен 270,25 кВт·ч/(м^2·год); $E_{Фi}$, кВт·ч/(м^2·мес), – среднемноголетний приход солнечной энергии на единицу поверхности солнечной батареи в *i*-й месяц года равен 1354,58 кВт·ч/(м^2·год); $S_{ЭФ}$, м^2, – экономически целесообразная площадь установленных солнечных батарей [8-10].

(9)

На рисунке 2 приведен удельный объем выработки энергии единицей площади теплового коллектора и фотоэлектрического модуля по месяцам года, кВт·ч/(м^2·мес.).



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII I	IX	X	XI	XII
Ei	74,5	91,9	135	163	214	242	239	224	183	133	84,9	61,7
V фi	12,7	14,2	19,1	22,2	28,5	33,6	31,9	31,8	28,4	22	15	10,6

Рисунок 2 - Удельная выработка энергии в тепловую (*V*т) и электрическую (*V*ф) в Юго-Восточных Каракумах с 1 м^2 по месяцам года

Таким образом, экономический потенциал тепловой энергии от солнечного излучения в регионе $W_{ЭТ}$ имеет растущую зависимость от величины годового объема энергии, снимаемой

с единицы поверхности теплового коллектора, определяющуюся тремя параметрами: критическим значением удельного съема энергии, экономическим параметром потребности промышленности региона в энергии и ценовым параметром промышленного производства. Данная зависимость в действительности является единой для любого нового источника энергии, замещающего традиционное топливо, в том числе как для тепловой энергии, так и для электрической энергии от солнечного излучения.

4.Экологический потенциал от выработки солнечную энергию в тепловую и электрическую

Экологический потенциал солнечной энергии – часть технического потенциала, преобразование, которого в полезную используемую энергию экологической целесообразно при данном уровне сокращение вредных выбросов в окружающую среду от ископаемого, органического топлива при преобразованию тепловую, электрическую энергию и других видов энергии от оборудовании, установок, станции и транспортных средств и др. загрязнителей.

В выражениях, определяющих экономическую эффективность, не учитывается влияние вводимых установок на окружающую природу, на социальные условия жизни и деятельности человека, что в целом определяется как экологические условия. Солнечная энергия по сравнению с традиционными обладают важными преимуществом, заключенным в возможности обеспечения экологической чистоты вводимых установок, а в некоторых случаях – возможности улучшения экологической обстановки.

Экологический потенциал солнечной энергии представляет сумму экономических потенциалов тепловой энергии и электрической энергии, получаемых соответствующим преобразованием солнечного излучения [7,8].

Одной из форм учета влияния вводимых источников энергии на экологию региона может быть введение в удельную стоимость получаемой энергии регионального экологического фактора источника, учитывающего относительные расходы на компенсацию вредных последствий ввода единицы энергии того или иного источника в регионе. Если удельная стоимость источника энергии в производстве, то удельная стоимость с учетом коэффициент регионального экологического фактора, причем коэффициент регионального экологического фактора > 1 для источника, приводящего к ухудшению экологической обстановки в регионе, и коэффициент регионального экологического фактора < 1 – для источника, улучшающего экологическую обстановку в регионе; для одного и того же источника экологического коэффициента в различных регионах может изменять величину, становиться больше или меньше единицы. На рисунке 3 представлены результаты сокращения антропогенных нагрузок с одного квадратного метра от преобразования солнечную энергию в тепло и электроэнергию.

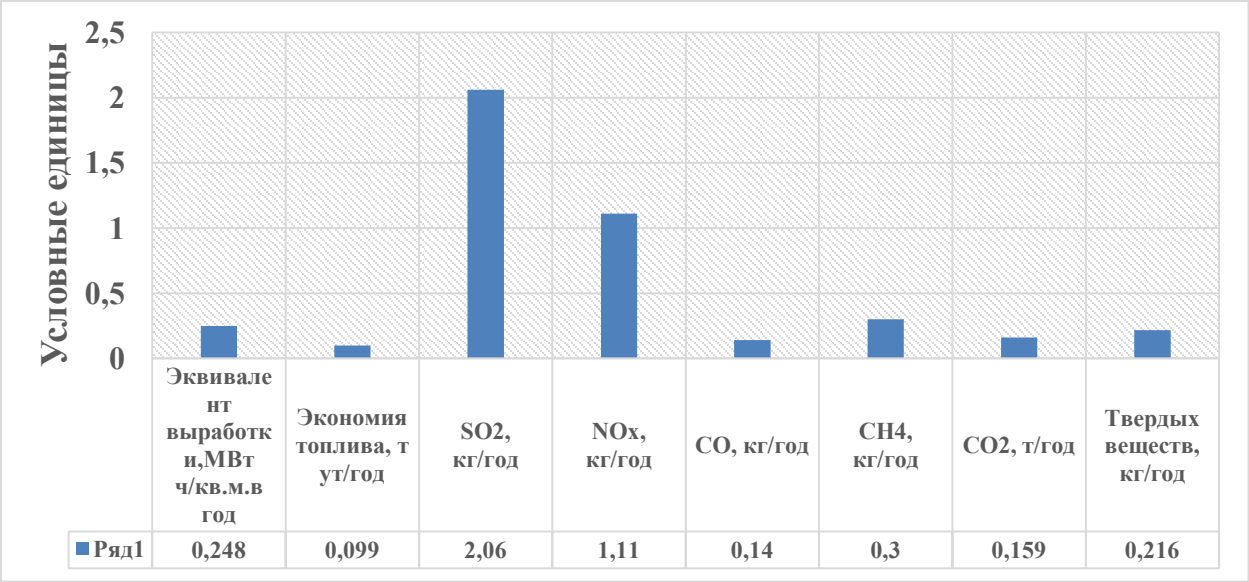


Рисунок 3 - Гистограмма выработки электроэнергии возможности сокращение выбросов различных вредных веществ в окружающую среду в течение года

Ожидаемый результат. Ожидаемые возможности сокращение выбросов различных вредных веществ в окружающую среду в Юго-Восточных Каракумах при использовании солнечной энергии составит:

- при годовой выработке с 1 кв. м 269,17 кВт ч/год, экономия расхода топлива 99,44кг у.т./год, сокращение выбросов: диоксид серы SO_2 – 2,1; оксид азота NO_x –1.1; оксид углерода CO- 0,14; метан CH_4 –0,3; двуокись углерода CO_2 –158,98; твердых веществ – 0,22 кг/год [7,8,13].

5.Определение оптимального угла наклона солнечных модулей в Юго-Восточных Каракум.

Результаты расчета для определения оптимального угла наклона солнечных модулей в Юго-Восточных Каракумах с учетом реального поступления солнечной энергии включает определение полного потока солнечной энергии на наклонную поверхность в течение определенного периода времени (например, за месяц в течение года) при различных углах наклона посредством интегрирования по времени. Расчеты показывают наиболее эффективное значение $\beta=60^{\circ}$ *для января, февраля, ноября, декабря;* $\beta=30^{\circ}$ с *апреля по сентябрь*; $\beta=45^{\circ}$ - *март, октябрь* [6,13-16].

Выводы

1.На основание теоретических исследований и методических расчетов солнечно – энергетических ресурсов с учетом интенсивности солнечного излучения, альбедо, географических, климатических и неблагоприятных погодных условий получены энергетические потенциалы на 1 квадратный метр Юго-Восточной территорий Туркменистана составляет: валовый потенциал - 1895,9 кВт ч/ $м^2$ год; технический потенциал в электрическую энергию - 248,55 кВт ч/ $м^2$ год.

2.Технико-экономические и теоретические расчеты экономических потенциалов позволят составить технико-экономическое обоснования при строительстве солнечно-энергетических станции, установок, сооружений для внедрения дадут возможность экономию органического топлива от преобразования в электрическую энергию – 269,17

кВт·ч/год.

3.Ожидаемый экологический потенциал сокращение выбросов различных вредных веществ в окружающую среду в Юго-Восточных территорий Туркменистана при использовании солнечной фотоэлектрической станции составит: при годовой выработке с 1 кв. м 248,55 кВт·ч/год, экономия расхода топлива 98,44 кг у.т./год, сокращение выбросов: диоксид серы SO_2 – 2,06; оксид азота NOx –1,11; оксид углерода CO - 0,143; метан CH_4 – 0,304; двуокись углерода CO_2 – 158,98; твердых веществ - 0,22 кг/год.

Список использованных источников:

1. Бердымухамедов, Г.М. Туркменистан на пути достижения Целей устойчивого развития./ Г.М. Бердымухамедов – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2018. – 465 с.
2. Бердымухамедов, Г.М. Электроэнергетическая мощь Туркменистана./ Г.М. Бердымухамедов. – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2022. - 130 с.
3. Использование солнечной энергии / Под общ. ред. Л.Е. Рыбаковой. – Ашхабад: Ылым, 1985. – 280 с.
4. Стребков Д.С. Основы солнечной энергетики. Под ред. д.т.н. Безруких П.П. М.:САМ Полиграфист. 2019.-326 с.
5. Лившиц С.А., Гарейшина А.А. Экономические перспективы солнечной энергетики в России: перспективы и проблемы развития Научный аспект. 2017. № 4-1. С. 159-162.
6. Научно - прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, ч.1-16, вып. - Л.: Гидрометиоиздат, 1989. - 502 с.
7. А.М. Пенджиев, Основы ГИС в развитии возобновляемой энергетики. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. - 308 с. ISBN 978-620-2-01229-4.
8. Виссарионов, В.И. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под общ. ред. В.И. Виссарионова. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 276 с.
9. Байрамов Р.Б., Ушакова А.Д. Солнечные водонагревательные установки. – Ашхабад: Из-во Ылым, 1987.-168 с.
10. Пенджив, А.М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии: монография/ А.М. Пенджив. - М.: Русайнс, 2023. – 400 с.
11. Ю.Д. Арбузов, В.М. Евдокимов. Основы фотоэлектричества. -М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012.-292 с.
12. Ваньков Ю.В., Запольская И.Н., Измайлова Е.В., Загретдинов А.Р., Плотникова Л.В. Снижение энергопотребления при переходе на горячее водоснабжение от индивидуальных тепловых пунктов/Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 1 (41). С. 19-27.
13. Стребков Д.С., Пенджиев А.М., Мамедсахатов Б.Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане: монография / Д.С. Стребков, А.М. Пенджиев, Б.Д. Мамедсахатов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012.- 498 с.
14. К.Я. Кондратьев, З.И. Пивоварова. Радиационный режим наклонных поверхностей. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 215 с.
15. Методика расчета мощности солнечных электростанций/ Г.П. Охоткин,//Вестник Чувашского университета.2013,вып №3.С.226.

16. Солнечные батареи. Таблицы инсоляции для расчета ФЭС. Режим доступа: http://www.solbat.su/meteorology/insolation свободный (Дата обращения: 05.05.2023/

LIST OF USED LITERATURE

1. Berdimuhamedov, G.M. Turkmenistan: Achieving the Sustainable Development Goals. / G.M. Berdimuhamedov – Ashgabat: Turkmen State Publishing Service, 2018. – 465 p.

2. Berdimuhamedov, G.M. Electric Power Capacity of Turkmenistan. / G.M. Berdimuhamedov – Ashgabat: Turkmen State Publishing Service, 2022. – 130 p.

3. The use of solar energy / Under total. ed. L.E. Rybakova. - Ashgabat: Ylym, 1985 .-- 280 p.

4. D.S. Strebkov. Fundamentals of solar energy. Ed. Doctor of Technical Sciences Bezrukikh P.P. M.: SAM Polygraphist. 2019.-326 p.

5. Livshits S.A., Gareishina A.A. Economic prospects of solar energy in Russia: prospects and development problems Scientific aspect. 2017. No. 4-1. S. 159-162.

6. Scientific - applied reference book on the climate of the USSR. Series 3, parts 1-16, no. - L .: Gidromethioizdat, 1989 .-- 502 p.

7. A.M. Penjiyev, Basics of GIS in the Development of Renewable Energy. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017 .-- 308 p. ISBN 978-620-2-01229-4.

8. Vissarionov, V.I. Solar energy: textbook for universities / V.I. Vissarionov, G.V. Deryugin, V.A. Kuznetsova, N.K. Malinin; under total. ed. IN AND. Vissarionov. - M .: Publishing house MEI, 2008 .-- 276 p.

9. R.B. Bayramov, Ushakova A.D. Solar water heating installations. - Ashgabat: Iz-vo Ylym, 1987.-168 p.

10. Penjiyev, A.M. Eco-energy resources of renewable energy sources: monograph / A.M. Penjiv. - M.: Rusains, 2023. – 400 p.

11. Yu.D. Arbuzov, V.M. Evdokimov. Photovoltaic basics. -M .: GNU VIESH, 2012.-292 p.

12. Vankov Yu.V., Zapolskaya IN, Izmailova EV, Zagretdinov AR, Plotnikova LV. Reducing energy consumption during the transition to hot water supply from individual heating points / Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2019.Vol. 11.No. 1 (41). S. 19-27.

13. Strebkov D.S., Penjiyev A.M., Mamedsakhatov B.D. Development of solar energy in Turkmenistan: monograph / D.S. Strebkov, A.M. Penjiyev, B.D. Mamedsahatov. - M .: GNU VIESH, 2012.- 498 p.

14. K. Ya. Kondratyev, Z. I. Pivovarova. Radiation regime of inclined surfaces. - L .: Gidrometeoizdat, 1978 .-- 215 p.

15. Methodology for calculating the power of solar power plants / G.P. Okhotkin, // Bulletin of the Chuvash University, 2013, issue No. 3, p. 226.

16. Solar panels. Insolation tables for calculating FES. Access mode: http://www.solbat.su/meteorology/insolation free (Date of access: 05/05/2023 /)

Пенджиев Ахмет Мырадович, доктор технических наук, доктор сельскохозяйственных наук, доцент кафедры Туркменского государственного архитектурно-строительного института, 744006, Туркменистан, Ашхабад, В.Аннанова 126, Электронный адрес: ampenjiyev@gmail.com, тел. моб. +7(993)65-80-17-54;

Астанов Непес Гурдович, старший преподаватель

Туркменский государственный педагогический институт им. С.Сейди

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL CALCULATIONS OF THE RESOURCE POTENTIALS OF SOLAR ENERGY IN THE NORTHERN KARAKUM

Ahmet Penjiyev[1], Nepes Astanov[2]

[1] Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering
[2] S. Seydi Turkmen State Pedagogical Institute

Abstract: The development of the Karakum Desert, which occupies 80% of Turkmenistan's land resources, is a pressing issue.

The objective of the study is to provide energy to the Karakum desert regions using solar energy technologies and installations.

The objective of the study is to determine solar energy resource potentials using innovative calculation methods in the development, creation, and implementation of efficient solar energy technologies and installations.

Methodology: To determine the gross, technical, economic, and environmental potential, the natural and climatic conditions of the Southeastern Karakum Desert were taken into account.

The research methodology involved using meteorological data processed using physical laws and mathematical calculation methods for photovoltaic converters.

Research Results. Theoretical and methodological calculations of the gross, technical, economic, and environmental potentials of solar energy were evaluated, the energy efficiency of solar radiation was determined, and the optimal solar collector tilt angles for the Southeastern Karakum Desert were calculated.

Discussion and Conclusion. The study yielded the following resource potentials for solar energy converted into electrical energy: gross potential - 1895.9 kWh/(m2•year); technical potential - 248.55 kWh/(m2•year); fuel savings - 99.44 kg eq./(m2•year); environmental potentials, CO2, - 158.98 kg/year. The most effective months of the year for using a solar collector in the South-Eastern Karakum Desert with an inclination angle of 60 degrees are January, February, November, December; 45 degrees - March, October; 30 degrees - from April to September.

Key words: gross, technical, economic, environmental potentials, solar energy, Karakum, Turkmenistan

Akhmet Myradovich Pendzhiev, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department, Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, 744006, Turkmenistan, Ashgabat, V. Annanov 126, Email: ampenjiyev@gmail.com, Mobile: +7(993)65-80-17-54;

Nepes Gurdovich Astanov, Senior Lecturer
S. Seydi Turkmen State Pedagogical Institute

УДК 664.8.047:621.311

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

А.А. Бородин, И.В. Алтухов

ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

Аннотация. *В статье рассматриваются ключевые технологические параметры инфракрасной (ИК) сушки растительного сырья — одного из наиболее перспективных энергосберегающих методов термической обработки. На основе анализа научных трудов и диссертационных исследований, в частности работ Авроров Г.В. и Афонькиной В.А., определены основные режимы и условия, влияющие на эффективность и качество процесса сушки. Особое внимание уделено параметрам, связанным с применением карбоновых инфракрасных нагревателей, которые обладают высокой степенью черноты, направленным излучением и возможностью точного регулирования длины волны. Установлено, что при соблюдении оптимальных параметров ИК-сушки (температура облучения 40–50 °С, длина волны 9 мкм, удельная мощность 300–400 Вт/м², расстояние от нагревателя до продукта 10–15 см) достигается снижение энергозатрат в 4–6 раз по сравнению с конвективной сушкой и сохранение до 60 % термолабильных компонентов, включая витамин С и эфирные масла.*

Ключевые слова: *инфракрасная сушка, растительное сырьё, карбоновые нагреватели, технологические параметры, энергоэффективность, термолабильность.*

Введение. Современные требования к качеству пищевой и фармацевтической продукции предполагают максимальное сохранение биологически активных веществ (БАВ), витаминов, пигментов и летучих компонентов (в частности, эфирных масел) в высушенном растительном сырье. Традиционные методы сушки — конвективный и контактный — часто не удовлетворяют этим критериям из-за длительного времени обработки и высоких температур нагрева, что приводит к термическому разрушению ценных компонентов [1]. В этой связи всё большее внимание уделяется радиационным методам сушки, в частности инфракрасной (ИК), которая обеспечивает направленный подвод энергии, высокую скорость процесса, низкую термическую инерцию и щадящую обработку термолабильного сырья [2].

Целью данной работы является систематизация и расширение представлений о технологических параметрах инфракрасной сушки растительного сырья с акцентом на применение карбоновых ИК-нагревателей, а также обоснование их преимуществ с точки зрения энергоэффективности и сохранения качества продукции.

Материалы и методы исследования. В основу исследования положены данные диссертационных работ, экспериментальных исследований и теоретические положения физики инфракрасного излучения. Использованы результаты исследований Авроров Г.В. [7], Афонькиной В.А. [4], а также собственные разработки авторов в области интеграции ИК-технологий в агропромышленные процессы. Применялись методы сравнительного анализа, теоретического моделирования спектрального поглощения и энергетического баланса процесса сушки.

Результаты исследования и их обсуждение.

1.Основные технологические параметры ИК-сушки

Ключевыми параметрами, определяющими эффективность инфракрасной сушки, являются:

Температура облучения. Оптимальный диапазон для большинства зеленных и плодовых культур лежит в пределах 40–50 °C. При превышении 60 °C начинается интенсивное разложение термолабильных соединений, включая витамин С, каротиноиды и летучие ароматические вещества [3]. Низкотемпературная ИК-сушка позволяет минимизировать термический стресс и сохранить структуру клеточных стенок.

Длина волны излучения. Вода — основной компонент растительного сырья — обладает пиками поглощения в ИК-диапазоне при длинах волн 3, 6, 9 и 12 мкм [5]. Максимальное поглощение энергии без поверхностного перегрева наблюдается при длине волны 9 мкм, что соответствует излучению, генерируемому карбоновыми нагревателями при температурах 400–500 К. Это объясняется согласованием спектральных характеристик источника и объекта сушки [4].

Удельная мощность нагревателей. В экспериментах Афонькиной В.А. использовались пленочные ИК-нагреватели с удельной мощностью 350 Вт/м² и степенью черноты 0,96, что приближает их к идеальному черному телу [4]. Карбоновые излучатели обладают аналогичными характеристиками и обеспечивают равномерное распределение плотности лучистого потока, что особенно важно для тонкослойной сушки.

Расстояние от нагревателя до материала. На расстоянии менее 10 см возможен локальный перегрев поверхности, а при увеличении расстояния свыше 15 см снижается интенсивность облучения вследствие закона обратных квадратов. Оптимальным принято считать расстояние 10–15 см [7].

Конструктивные особенности сушилок. Эффективность процесса возрастает при использовании отражателей, цилиндрических или параболических, которые фокусируют лучистый поток на материале. В работах Авророва Г.В. применён цилиндрический отражатель, обеспечивающий многостороннее облучение и устраняющий «тени» на поверхности продукта [7].

2.Энергетическая и качественная эффективность

ИК-сушка демонстрирует значительное преимущество в энергопотреблении. По данным Авророва Г.В., применение ИК-ламп мощностью 0,5 кВт для поддержания температуры 350 °C в рабочей зоне требует 3,12 кВт·ч, тогда как аналогичная конвективная установка с ТЭНами — до 32 кВт·ч [7]. Это свидетельствует о 10-кратном снижении энергозатрат.

При сушке тыквы (начальная влажность 80 %, конечная — 18 %) при температуре 50 °C время процесса составило 180 мин, а удельные энергозатраты — всего 0,225 кВт·ч/кг [7]. В случае с зеленью (петрушка, укроп) аналогичные параметры достигались за 60 мин с энергозатратами 0,9 кВт·ч на 1 кг испарённой влаги [4].

Качественные показатели продукции также значительно выше: содержание витамина С сохраняется на 60 % больше, чем при конвективной сушке, а органолептические характеристики соответствуют требованиям ГОСТ [4].

3.Преимущества карбоновых ИК-нагревателей.

Карбоновые инфракрасные нагреватели — современные источники излучения на основе углеродной нити или плёнки — обладают рядом ключевых преимуществ:

высокая степень черноты ($\varepsilon \geq 0{,}95$), обеспечивающая эффективное излучение близко к спектру абсолютно чёрного тела;

возможность точной регулировки длины волны путём изменения температуры нити;

низкая инерционность (выход на рабочий режим за 15–30 с);

долговечность и устойчивость к циклическим нагревам;

высокая электробезопасность и совместимость с системами автоматического управления, включая IoT-платформы.

Эти свойства делают карбоновые нагреватели перспективными элементами в составе интеллектуальных сушильных комплексов, особенно в контексте задач повышения энергоэффективности агротехнологий.

Заключение. Инфракрасная сушка растительного сырья представляет собой высокоэффективный энергосберегающий метод термической обработки, обеспечивающий не только значительное сокращение времени и энергозатрат по сравнению с традиционными конвективными технологиями, но и существенное улучшение качества конечного продукта за счёт щадящего воздействия на термолабильные компоненты. Ключевыми факторами, определяющими эффективность процесса, являются температура облучения в диапазоне 40–50 °C, длина волны излучения около 9 мкм, удельная мощность нагревателей 300–400 Вт/м², расстояние до материала 10–15 см, а также конструктивные особенности сушильной установки, включая использование отражателей и равномерное распределение лучистого потока. Применение карбоновых инфракрасных нагревателей, характеризующихся высокой степенью черноты, низкой инерционностью и возможностью точной настройки спектральных характеристик, позволяет достичь оптимального согласования между источником излучения и свойствами высушиваемого сырья, что открывает перспективы для их широкого внедрения в современные интеллектуальные сушильные комплексы, ориентированные на энергоэффективность, цифровизацию и сохранение биологической ценности растительного сырья.

Список использованных источников:

1. Данилов, О.Л., Леончик, Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 136 с.

2. Лыков, А.В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 512 с.

3. Марюшин, Л.А. Терморадиационный обогрев и сушка термолабильных материалов: дис. ... канд. техн. наук. — М., 1997. — 148 с.

4. Афонькина, В.А. Сушка термолабильных культур в ИК-диапазоне с учетом оптических свойств продукта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2012. — № 26 (294). — С. 17–20.

5. Гинзбург, А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 528 с.

6. Плаксин, Ю.М. Научно-технические основы пищевой технологии при ИК-энергоподводе: дис. ... докт. техн. наук. — М.: МГАПП, 1993.

7. Авроров, Г.В. Сокращение энергетических затрат сушки капиллярно-пористых материалов растительного происхождения за счет направленного подвода инфракрасного излучения: дис. ... канд. техн. наук. — Пенза, 2014. — 144 с.

8. Алтухов И.В. Влияние режимов импульсной инфракрасной обработки и сушки томатов на биотехнические условия нагрева / И.В. Алтухов, С.М. Быкова // Вестник КрасГАУ. – 2019. – № 10. – С. 132-138.

Bibliography:

1. Danilov, O. L., & Leontchik, B. I. *Energy Saving in Thermal Drying*. Moscow:

Energoatomizdat, 1986. 136 p.

2. Lykov, A. V. *Theory of Drying*. Moscow: Energiya, 1968. 512 p.

3. Maryushin, L. A. *Thermoradiative Heating and Drying of Thermolabile Materials*: Cand. Tech. Sci. Diss. Moscow, 1997. 148 p.

4. Afonkina, V. A. Drying of Thermolabile Crops in the Infrared Range Taking into Account the Optical Properties of the Product. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2012, no. 26 (294), pp. 17–20.

5. Ginsburg, A. S. *Fundamentals of the Theory and Technology of Drying Food Products*. Moscow: Pishchevaya Promyshlennost', 1973. 528 p.

6. Plaksin, Yu. M. *Scientific and Technical Foundations of Food Technology with Infrared Energy Input*: Dr. Tech. Sci. Diss. Moscow: MGAPP, 1993.

7. Avrorov, G. V. *Reduction of Energy Consumption in Drying Capillary-Porous Plant Materials through Directed Infrared Radiation*: Cand. Tech. Sci. Diss. Penza, 2014. 144 p.

8. Altukhov, I. V., & Bykova, S. M. Influence of Pulsed Infrared Treatment and Drying Modes on Biotechnical Heating Conditions of Tomatoes. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2019, no. 10, pp. 132–138.

Бородин Алексей Андреевич, аспирант, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутский район, Россия, e-mail: Lyoxa.borodin.2012@gmail.com

Алтухов Игорь Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутский район, Россия, e-mail: altukhigor@yandex.ru

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF INFRARED DRYING OF PLANT RAW MATERIALS

A.A. Borodin, I.V. Altukhov
FSBEI HE Irkutsk State Agrarian University

Annotation. This article examines the key technological parameters of infrared (IR) drying of plant raw materials—one of the most promising energy-saving methods of thermal processing. Based on an analysis of scientific publications and dissertation research, particularly the works of G.V. Avrorov and V.A. Afonkina, the primary operating regimes and conditions affecting the efficiency and quality of the drying process have been identified. Special attention is given to parameters associated with carbon infrared heaters, which exhibit a high emissivity, directional radiation, and the ability to precisely control the emitted wavelength. It has been established that when optimal IR drying parameters are maintained—radiation temperature of 40–50 °C, wavelength of 9 μm, specific power of 300–400 W/m², and emitter-to-product distance of 10–15 cm—energy consumption is reduced by 4–6 times compared to convective drying, while up to 60 % of thermolabile compounds, including vitamin C and essential oils, are preserved.

Keywords. infrared drying, plant raw materials, carbon heaters, technological parameters, energy efficiency, thermolability.

Borodin A. A., Graduate Student, FSBEI HE Irkutsk State Agrarian University, Molodezhny, Irkutsk District, Russia, e-mail: Lyoxa.borodin.2012@gmail.com

Altukhov I. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, FSBEI HE Irkutsk State Agrarian University, Molodezhny, Irkutsk District, Russia, e-mail: altukhigor@yandex.ru

УДК 629.33:621.331.6

БЕСПРОВОДНАЯ ЗАРЯДКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

А.А. Ишмакова, Д.Ф. Балтиков

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

Аннотация. *В статье подробно рассматриваются современные технологии беспроводной зарядки электромобилей, раскрываются принципы их функционирования и анализируются глобальные тенденции внедрения подобных систем. Особое внимание уделено индуктивным и резонансным методам передачи энергии, их сравнительным характеристикам и инженерным решениям, позволяющим повысить надежность и эффективность процессов зарядки. Приведены актуальные данные о научных исследованиях, ориентированных на повышение КПД передающих и принимающих модулей, стандартизацию аппаратных компонентов, а также на интеграцию беспроводных зарядных систем с интеллектуальными энергосетями. Дополнительно рассматриваются вопросы кибербезопасности, оптимизации стоимости производства, адаптации инфраструктуры городов к новым технологиям и возможного влияния широкого внедрения беспроводной зарядки на развитие транспортной экосистемы в целом.*

Ключевые слова: *электромобили, беспроводная зарядка, индуктивная передача энергии, резонансная зарядка, инфраструктура, интеллектуальная сеть.*

Введение. Стремительное распространение электрического транспорта в последние годы формирует устойчивый запрос на создание удобной, надёжной и высокоэффективной инфраструктуры зарядки. Рост количества электромобилей, внедрение интеллектуальных энергосистем и развитие автономных транспортных платформ делают традиционные проводные зарядные станции всё менее соответствующими будущим требованиям эксплуатации [1]. Несмотря на их высокую мощность и широкую доступность, проводные решения имеют ряд ограничений: необходимость ручного подключения, механический износ разъёмов, риск повреждений кабелей, снижение безопасности в условиях влажности или низких температур, а также сложность интеграции в полностью автоматизированные транспортные комплексы.

На фоне этих вызовов существенный интерес представляют технологии беспроводной передачи энергии (Wireless Power Transfer, WPT), основанные на принципах индуктивной или резонансной электромагнитной связи между передающим и приёмным устройствами. Подобные системы позволяют исключить физический контакт между электромобилем и зарядной станцией, обеспечивая автоматизированную, безопасную и удобную зарядку как в стационарных условиях (парковки, частные дома, общественный транспорт), так и в динамических — непосредственно во время движения автомобиля по дороге [2-4].

Применение WPT-технологий открывает новые возможности не только для частных автомобилей, но и для тяжёлого транспорта, общественного транспорта, роботизированных платформ и автономных такси. Интеграция беспроводных зарядных модулей в элементы городской инфраструктуры способствует созданию «умных» транспортных систем, способных автоматически распределять нагрузку в энергосети, взаимодействовать с инфраструктурой Smart Grid, использовать двухсторонний обмен энергией (V2G) и оптимизировать потребление электроэнергии.

Однако внедрение беспроводной зарядки сопровождается техническими и инженерными вызовами (рисунок 1). Среди ключевых проблем — необходимость точного позиционирования катушек, ограниченная дальность передачи энергии, снижение КПД при смещении или изменении зазора, требования по электромагнитной совместимости, а также достаточно высокая стоимость оборудования [5-8]. Кроме того, динамические системы зарядки, несмотря на впечатляющие перспективы, требуют серьёзных инфраструктурных вложений и сложной синхронизации катушек с движущимся автомобилем.



Рисунок 1 - Беспроводная зарядка для электротранспорта

Научное сообщество активно работает над решением этих задач. Исследования направлены на повышение эффективности передачи энергии за счёт оптимизации формы катушек, применения ферромагнитных концентраторов, разработки новых резонансных схем, адаптивного управления частотой, улучшения системы выравнивания и сокращения потерь на стороне силовой электроники. Особое значение имеют вопросы стандартизации, обеспечивающей совместимость оборудования разных производителей и безопасность эксплуатации. Международные стандарты SAE J2954 и IEC 61980 выступают ключевыми документами, регулирующими параметры и требования для беспроводных зарядных систем.

В связи с этим особую актуальность приобретает построение математических моделей, описывающих токи, напряжения, режимы работы и параметры передачи энергии в индуктивной беспроводной системе. Такие модели позволяют проводить расчёты эффективности, оценивать влияние параметров катушек и частоты на передаваемую мощность, создавать более точные инженерные решения и проектировать системы нового поколения.

Работа посвящена комплексному исследованию технологий беспроводной зарядки электромобилей, анализу тенденций развития отрасли, а также разработке и применению математической модели, описывающей процессы в связанных индуктивных катушках.

Целью работы является анализ технологий беспроводной зарядки электромобилей, оценка их перспектив и разработка математической модели, описывающей силу тока и напряжение в связанных катушках индуктивной зарядной системы, а также анализ влияния параметров системы на эффективность передачи энергии. **Задачей** исследования является оценка технологии беспроводной зарядки электромобилей, выявить их преимущества и ограничения, а также определить ключевые направления развития и внедрения в транспортную инфраструктуру.

Условия, материалы и методы.

Исследование выполнено в условиях анализа современных беспроводных зарядных систем (рисунок 2), представленных на международном рынке, а также экспериментальных и теоретических данных, опубликованных в научных журналах и стандартах по беспроводной передаче энергии. В основу исследования легли материалы SAE International, IEC, результаты испытаний компаний WiTricity, Qualcomm Halo, Electreon и OLEV, а также зарубежных и российских исследовательских центров, занимающихся разработкой систем индуктивной и резонансной зарядки.

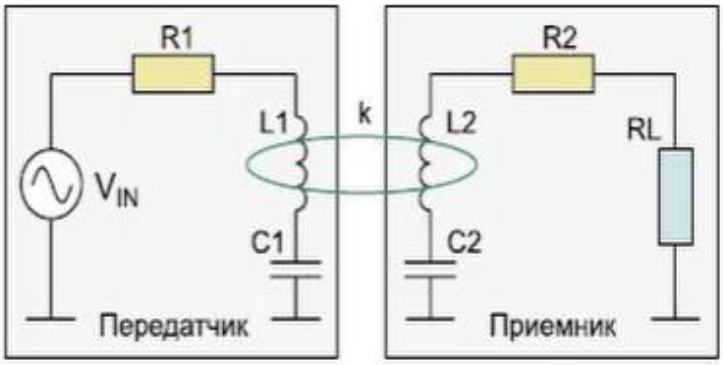


Рисунок 2 - Принцип работы беспроводного зарядного устройства

Для решения поставленных задач использованы следующие методы [9,10]:

1. Аналитический метод

Проведен обзор существующих технологий беспроводной зарядки, включая:

- индуктивный метод (IPT);
- магнитно-резонансный метод (MR-WPT);
- гибридные IPT/MR - решения;
- динамическую подзарядку (Dynamic Wireless Charging);
- высокочастотные системы с адаптивным управлением частотой.

Сравнивались КПД, рабочие частоты, конструктивные особенности катушек, материалы ферромагнитных направляющих, а также схемы компенсации.

2. Метод математического моделирования [11]

На основе классической теории взаимной индуктивности построена математическая модель, которая описывает:

- токи в первичной и вторичной катушках;
- напряжения на сторонах передатчика и приемника;
- передаваемую мощность;
- влияние основных параметров (L, C, R, K, рабочей частоты) на эффективность.

Модель включает дифференциальные уравнения и их частотные преобразования, позволяющие вычислять характеристики системы как в стационарном, так и в переходном режиме.

3. Метод параметрической оптимизации

Для оценки эффективности беспроводной системы были исследованы параметры:

- коэффициент связи K_1;
- добротности контуров Q_1, Q_2;
- величина зазора между катушками;
- смещение катушек вдоль осей X-Y;

- частотный диапазон 70-90 кГц.

На их основе вычислялось изменение КПД по формуле:

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + k^2 Q_1 Q_2}$$

и анализировались влияющие факторы.

4. Метод сравнительного анализа

Произведено сравнение отечественных и зарубежных систем по параметрам:

- эффективность;
- мощность передачи;
- требования к инфраструктуре;
- стоимость реализации;
- уровень зрелости технологий.

Выделяют несколько основных систем беспроводной передачи энергии. Каждая из этих технологий имеет свои преимущества, ограничения и области оптимального применения. Индуктивные системы характеризуются высокой стабильностью и отработанностью, но требуют точного позиционирования. Резонансные системы обеспечивают больший рабочий зазор и гибкость, однако сложнее в настройке и чувствительнее к внешним условиям. Динамические решения позволяют заряжать электромобиль в процессе движения, что открывает перспективы радикального уменьшения ёмкости аккумуляторов, однако требуют дорогостоящей инфраструктуры и высокой точности синхронизации [12].

Для объективной оценки возможностей разных технологий и их применимости в городских и транспортных системах будущего представлено сравнительное описание основных типов беспроводной зарядки (таблица 1). Оно демонстрирует различия в эффективности, стоимости внедрения, требованиях к инфраструктуре и уровне технологической зрелости.

Таблица 1 - Сравнение типов беспроводной зарядки

Тип технологии	Преимущества	Недостатки	Мощность
Индуктивная IPT	Высокая надежность, стандартизация	Требует точного выравнивания	3-22 кВт
Резонансная MR	Большой рабочий зазор	Сложность настройки	3-50 кВт
Динамическая WPT	Зарядка на ходу	Высокая стоимость	20-200 кВт

Результаты и обсуждение. Анализ литературных источников и выполненная математическая модель показывают:

1. Стационарные беспроводные зарядки обеспечивают мощность 3,3–22 кВт и КПД до 95%, что сопоставимо с проводными станциями.

2. Динамическая индуктивная зарядка демонстрирует возможности передачи мощности 20–200 кВт, но требует дорогой инфраструктуры.

3. Перспективы развития связаны с:

- использованием новых ферритов,
- активным управлением магнитным полем,
- стандартизацией по SAE J2954,

- интеграцией с автономными транспортными системами.

Выводы.

1. Беспроводные системы являются перспективным направлением развития электротранспорта, обеспечивая удобство, безопасность и интеграцию в «умные» энергосети.

2. Технологии динамической зарядки обладают высокой перспективностью, но требуют значительных инвестиций в инфраструктуру.

3. Международные стандарты SAE J2954 и IEC 61980 формируют техническую основу для массового внедрения беспроводных зарядок.

Список использованных источников:

1. Андреев С. В., Каримов Р. А. Электромобили и устойчивое развитие транспорта. – Казань: КФУ, 2020. – 200 с.
2. Воронцов А. В., Лаптев С. Г. Зарядная инфраструктура электромобилей: состояние и перспективы. – Москва: Энергия, 2022. – 188 с.
3. Жданов В. Н. Электротранспорт: технологии и перспективы развития. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2021. – 312 с.
4. Ларионов П. Ю. Современные аккумуляторные технологии. – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – 264 с.
5. Международное энергетическое агентство. Global EV Outlook 2023. – Paris: IEA, 2023. – 354 p.
6. Петров А. В., Сидоров М. Н. Электромобильность в России: проблемы и перспективы развития. – Москва: Инфра-М, 2022. – 212 с
7. Попов А. М. Электрический транспорт: история, современность, будущее. – Москва: Машиностроение, 2021. – 240 с.
8. Савельев Д. П. Твердотельные аккумуляторы: перспективы и вызовы. – Новосибирск: СО РАН, 2021. – 148 с.
9. Хасанов Р. И., Сулейманов Д. Р. Интеллектуальные энергосети и интеграция электромобилей. – Уфа: БашГУ, 2022. – 176 с.
10. Балтиков, Д. Ф. Энергообеспечение птицеводческих хозяйств / Д. Ф. Балтиков, А. Т. Ахметшин, А. Ф. Ибатуллина // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2(94). – С. 170-175. – EDN MKJXBB.
11. Электроснабжение базовой станции сотовой связи на базе фото-ветро-дизельных энергоустановок / Д. Ф. Балтиков, Э. Ф. Муратова, Д. Р. Ибрагимов, И. И. Габдуллина // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. – Т. 8, № 4(30). – С. 125-129. – EDN WSHZNI.
12. Балтиков, Д. Ф. Гибридная система электроснабжения децентрализованной базовой станции мобильной связи с применением фото-, ветро-, дизель-генераторов / Д. Ф. Балтиков, И. И. Галимова, М. С. Гарафутдинова // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК : материалы международной научно-практической конференции в рамках XXXI Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2021», Уфа, 23–26 марта 2021 года / МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ; МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН; ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «БАШКИРСКИЙ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»; ООО «БАШКИРСКАЯ ВЫСТАВОЧНАЯ КОМПАНИЯ». Том Часть 2. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2021. – С. 200-206. – EDN HXGSQH.

Bibliography:

1. Andreev S. V., Karimov R. A. Electric Vehicles and Sustainable Transport Development. Kazan: Kazan Federal University, 2020, 200 p.

2. Vorontsov A. V., Laptev S. G. Electric Vehicle Charging Infrastructure: Status and Prospects. Moscow: Energia, 2022, 188 p.

3. Zhdanov V. N. Electric Transport: Technologies and Development Prospects. St. Petersburg: Polytech-Press, 2021, 312 p.

4. Larionov P. Yu. Modern Battery Technologies. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2021, 264 p.

5. International Energy Agency. Global EV Outlook 2023. Paris: IEA, 2023, 354 p.

6. Petrov A. V., Sidorov M. N. Electromobility in Russia: Problems and Development Prospects. Moscow: Infra-M, 2022, 212 p.

7. Popov A. M. Electric Transport: History, Modernity, Future. Moscow: Mashinostroenie, 2021, 240 p.

8. Savelyev D. P. Solid-State Batteries: Prospects and Challenges. Novosibirsk: SB RAS, 2021, 148 p.

9. Khasanov R. I., Suleimanov D. R. Smart Power Grids and Integration of Electric Vehicles. Ufa: Bashkir State University, 2022, 176 p.

10. Baltikov, D. F. Power Supply of Poultry Farms / D. F. Baltikov, A. T. Akhmetshin, A. F. Ibatullina // Bulletin of the Orenburg State Agrarian University. - 2022. - No. 2 (94). - P. 170-175. - EDN MKJXBB.

11. Power Supply of a Cellular Base Station Based on Photo-Wind-Diesel Power Plants / D. F. Baltikov, E. F. Muratova, D. R. Ibragimov, I. I. Gabdullina // International Journal of Information Technology and Energy Efficiency. - 2023. - Vol. 8, No. 4 (30). - P. 125-129. - EDN WSHZNI.

12. Baltikov, D. F. Hybrid power supply system of a decentralized base station for mobile communications using photo-, wind-, and diesel generators / D. F. Baltikov, I. I. Galimova, M. S. Garafutdinova // Current state, traditions, and innovative technologies in the development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference within the framework of the XXXI International specialized exhibition "Agrocomplex-2021", Ufa, March 23–26, 2021 / MINISTRY OF AGRICULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION; MINISTRY OF AGRICULTURE OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN; FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION “BASHKIR STATE AGRICULTURAL UNIVERSITY”; LLC "BASHKIR EXHIBITION COMPANY" Volume Part 2. - Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2021. - P. 200-206. – EDN HXGSQH.

Ишмакова Алсу Альбертовна – магистр 1 курса энергетического факультета ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. Адрес: г. Уфа, 50-лет Октября, 34, e-mail: alsushechka2003@mail.ru

Балтиков Денис Фаилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО Башкирский

ГАУ. Адрес: г. Уфа, 50-лет Октября, 34, тел. +7 (347) 252-66-10, e-mail: baltikov21@gmail.com

WIRELESS CHARGING FOR ELECTRIC VEHICLE

A.A. Ishmakova, D.F. Baltikov

FGBOU VO Bashkir State Agrarian University

Abstract. This article examines modern wireless charging technologies for electric vehicles in detail, reveals their operating principles, and analyzes global trends in the implementation of such systems. Particular attention is paid to inductive and resonant energy transfer methods, their comparative characteristics, and engineering solutions for improving the reliability and efficiency of charging processes. The article presents current data on scientific research aimed at increasing the efficiency of transmitting and receiving modules, standardizing hardware components, and integrating wireless charging systems with smart grids. Additionally, it addresses issues of cybersecurity, production cost optimization, adapting urban infrastructure to new technologies, and the potential impact of widespread wireless charging on the development of the overall transportation ecosystem.

Keywords: electric vehicles, wireless charging, inductive energy transfer, resonant charging, infrastructure, smart grid.

Alsu Albertovna Ishmakova, First-Year Master's Student, Faculty of Power Engineering, Bashkir State Agrarian University. Address: 34, 50-let Oktyabrya St., Ufa, Email: alsushechka2003@mail

Denis Failevich Baltikov, PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Automation of Technological Processes, Bashkir State Agrarian University. Address: 34, 50-let Oktyabrya St., Ufa, Tel.: +7 (347) 252-66-10, Email: baltikov21@gmail.com

УДК 621.311.24

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОБЩУЮ СЕТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В.В. Кравец, Э.А. Бекиров

КФУ имени В.И.Вернадского

Аннотация. *Рассмотрена энергосистема содержащая тепловую и ветровую электростанции в своем составе. Совместное использование традиционных и возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии позволяет уменьшить ущерб экологии, в то же время снижает количество проблем, существующих в энергосистемах, имеющих в своем составе только ВЭС, таких как зависимость производства электричества от скорости ветра и прочие. Производится расчёт выработки электроэнергии и потребления топлива тепловой электростанцией при неработающей и работающей ветровой электростанцией. Полученные данные сведены в таблицу. По полученным данным построен график, показывающий зависимость выработки электроэнергии на ТЭС, в зависимости от работы ВЭС, в течении года. Приводится сумма сэкономленных средств, на топливе для тепловой электростанции (25 849 246,1 руб.) и количество не выброшенного в атмосферу углекислого газа (24896,03 тонн), при совместной работе тепловой и ветровой электростанций.*

Ключевые слова: *электроэнергия, ВЭС, ТЭС, энергоэффективность, теорема Лагранжа*

Введение. Для любого энергетического проекта решающим является его рентабельность и энергоэффективность. Для обеспечения этого необходимо проводить всеобъемлющие расчёты. Чем больше капиталовложений необходимо сделать, тем важнее и точнее должен быть технико-экономический анализ. Снижение затрачиваемого в ходе работы тепловых станций топлива приводит к уменьшению затрат и выбросов вредных продуктов горения.

Анализ баланса мощности энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя в период собственного максимума нагрузки энергосистемы показывает, что с учетом передачи мощности в энергосистемы Херсонской и Запорожской областей и использования мощности мобильных ГТЭС на уровне располагаемой мощности, в случае отключения одного из наиболее крупных энергоблоков энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя (энергоблока Балаклавской ТЭС мощностью 251,5 МВт) с 2025 года возникает превышение перетоком мощности величины максимально допустимого значения в КС «ОЭС Юга – Крым». Соответственно в период 2025 – 2030 годов прогнозируется непокрываемый дефицит мощности в нормальной и единичной ремонтной схемах 18 – 176 МВт и 291 – 488 МВт соответственно [1].

Данный анализ, который был произведен Минэнерго России в 2024 году, показывает растущую необходимость оптимизации, как объектов существующей объединённой энергосистемы Юга за КС «Волгоград – Ростов» в частности, так и различных элементов энергосистемы Российской Федерации в целом.

Цель работы – произвести расчёт выработки электроэнергии на ТЭС и ВЭС,

мощностью по 16 МВт, на его основе сделать выводы о степени замещения ТЭС с помощью ВЭС, сэкономленных при этом средствах, а также изменению количества выбросов диоксида углерода в атмосферу.

Материалы и методы

Наличие большого числа допустимых вариантов вызывает трудности при решении задач оптимизации. На данный момент существуют математические методы, позволяющие на основе определенных алгоритмов находить оптимальное решение. Для нахождение таких решений используют математические моделирование.

Построение математических моделей включает в себя два этапа[2]:

1. Составляется целевая функция (например, максимизируется прибыль или минимизируются потери), зависящая от неизвестных величин.

2. Формулируются условия (в виде равенств или неравенств), которые должны быть наложены на переменные.

Для решения задач оптимизации в энергосистеме используют методы, основанные на теореме Лагранжа.

Пусть дана целевая функция $f(x_1, x_2, ..., x_n)$. На переменные x 1, ..., x_n этой функции наложено m ограничений-равенств $g_i(x_1, x_2, ..., x_n)$ (в каждое конкретное ограничение могут входить не все переменные, а только их часть). Тогда задача оптимизации формулируется следующими уравнениями [3]:

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_n) \rightarrow min, \quad (1)$$

$$g_i(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0, i = 1, \ldots, m. \quad (2)$$

Если $m = n$, то равенства (6.3) определяют однозначный набор значений x_1, ..., x_n, и оптимизация невозможна. Поэтому, чтобы режим был оптимизируемым, должно выполняться условие $m < n$. Разность (n - m) называется числом степеней свободы системы и представляет собой количество переменных, которые в процессе оптимизации могут варьироваться независимо друг от друга.

Соответственно используя метод Лагранжа, можно найти условный или относительный экстремум целевой функции $f(x_1...x_1)$ с учетом m заданных ограничений форме равенств Wj=0, j=1...m.

Для того чтобы определить экстремум - вектор x^{onm}
необходимо найти m числа $\lambda_1 ... \lambda_m$ (множителей Лагранжа), которые
совместно с X удовлетворяют (m+n) уравнениям. Полученным приравниванием нулю частных производных функции Лагранжа[4]:

$$L(||X||, ||\lambda||) = f(||X||) + \sum_{j=1}^{m} \lambda_j W_j(||X||) \quad (3)$$

по оптимизируемым параметров $x.. x_n$ и по множителям Лагранжа $\lambda_1 ... \lambda_m$.

Поэтому чтобы найти оптимальные значения параметров $x_1 ... x_n$, которые соответствует экстремум целевой функции $f(x_1 ...x_n)$ необходимо совместно решить систему n+m уравнения с n+m неизвестных.

Использования метода множителей Лагранжа позволяет решать задачи на условный экстремум, например, задачу оптимизации распределения активной нагрузки между различными источниками.

Результаты и обсуждение. Рассматривается энергосистема, в составе которой присутствует Тепловая электростанция (ТЭС) и Ветровая электростанция (ВЭС). Максимальная мощность станций составляет 16 МВт каждая. На ВЭС устанавливаются ветрогенераторы YASHEL LT100KW**,** характеристики которых приведены в табл.1.

Количество ветрогенераторов на ВЭС — 160.

Таблица 1 - Параметры ветрогенератора Yashel LT100KW

Количество лопастей	3
Максимальная мощность генератора, кВт	130 кВт
Мачта	30/36 метров
Мощность номинальная (Вт)	100 кВт
Диаметр ротора, см	2200
Стартовая скорость ветра, м/с	3 м/с
Номинальная скорость ветра, м/с	10 м/с

Работа ВЭС в энергосистеме позволяет уменьшить количество необходимого для работы ТЭС топлива, и соответственно снизить выбросы диоксида углерода(CO_2) в атмосферу.

Произведем расчёт параметров при совместной работе ТЭС и ВЭС.

Мощность, которую вырабатывает ТЭС при неработающей ВЭС, за год:

$$W_{\text{ТЭС}} = \sum_{j=1}^{12}(P_{\text{ТЭС}} \cdot k_i \cdot 24), \quad (4)$$

где k — количество дней в месяце.

Количество топлива, используемое ТЭС, при не рабочей ВЭС:

$$B_{\text{ТЭС}} = W_{\text{ТЭС}} \cdot b \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где b — количество условного топлива, принимаем 313,1 грамм на 1 кВт/ч[5].

Энергия, вырабатываема на ВЭС, за месяц:

$$W_{\text{ВЭС}} = \frac{\eta \cdot R \cdot V^3 \cdot S}{2} \cdot N \cdot 10^{-6} \cdot 24 \cdot k, \quad (6)$$

где η — КПД турбины. Параметр невозможности круглосуточного потока ветра для максимальной мощности. k ≈ 0,2-0,5. Принимаем равным 0,5;

R — плотность воздушного потока. Принимаем приблизительно равной 1,225 кг/м^3;

V — скорость ветра, м/с;

S=πD^2/4 — площадь ветрового потока, м^2, где D - диаметр лопастей ветрогенератора, м;

N — количество ветрогенераторов;

k — количество дней в месяце.

Процент замещения ТЭС при вводе ВЭС:

$$\mu_1 = \frac{W_{\text{ВЭС}} \cdot 100}{W_{\text{ТЭС}}} \quad (7)$$

Энергия, которую вырабатывает ТЭС при работе ВЭС:

$$W_{\text{Общ}} = W_{\text{ТЭС}} - W_{\text{ВЭС}} \quad (8)$$

Количество топлива, используемого для работы ТЭС, при работе ВЭС, в тоннах условного топлива(т.у.т.):

$$B_{\text{Общ}} = W_{\text{Общ}} \cdot b \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

Количества сэкономленного топлива, за счёт использования ВЭС, т.у.т.:

$$B_{\text{топл}} = W_{\text{ВЭС}} \cdot b \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Количество CO_2, в тоннах:

$$M_{co2} = W_{\text{ВЭС}} \cdot b \cdot j \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

Принимаем количество CO_2 при сжигании 1 т.у.т. равным j=2,555 т[6].

По полученным данным(табл.2), построены графики зависимостей генерируемой электроэнергии ВЭС и ТЭС(рис.1).

Таким образом экономия условного топлива составляет 9744,04 т.у.т. в год, что составляет 11 238,8 тонн Кузнецкого угля. Примем стоимость 1 тонны угля марки ТР в 2300 руб.[7, 8]. Тогда экономия топлива при одновременной работе ТЭС и ВЭС составит 25 849 246,1 руб. в год.

Выводы

Произведён анализ работы ВЭС и ТЭС. Получены процентные соотношения выработки ВЭС относительно ТЭС (μ_1). Произведен расчёт экономии топлива(уголь) потребляемого ТЭС, в течении года, при использовании ВЭС, которая составила 25 849 246,1 руб. Посчитано количество CO_2, не выброшенного в атмосферу, в результате экономии топлива для ТЭС, которое составляет 24896,03 тонн.

Таблица 2 - Параметры энергосистемы

№	Параметр	Ед. измерения	Месяц					
			1	2	3	4	5	6
			Производство энергии на ТЭС при неработающей ВЭС					
1	$W_{ТЭС}$	МВт·ч	11904	10752	11904	11520	11904	11520
2	$B_{ТЭС}$	т.у.т.	3727,14	3366,45	3727,14	3606,91	3727,14	3606,91
			Производство энергии ВЭС					
3	$V_{Ветер}$	м/с	6,62	6,16	5,6	5,28	5,04	4,46
4	$W_{ВЭС}$	МВт·ч	4020,48	2925,79	2433,71	1974,08	1774,17	1189,78
			Процент замещения ТЭС					
5	μ_1	%	33,7742	27,2116	20,4444	17,1361	14,904	10,328
			Производство энергии на ТЭС при работе ВЭС					
6	$W_{общ}$	МВт·ч	7883,52	7826,21	9470,29	9545,92	10129,8	10330,2
7	$B_{общ}$	т.у.т.	2468,33	2450,39	2965,15	2988,83	3171,65	3234,39
			Количество сэкономленного топлива за счёт работы ВЭС					
8	$B_{топл}$	т.у.т.	1258,81	916,064	761,994	618,086	555,493	372,522
9	M_{CO2}	т.	3216,27	2340,54	1946,89	1579,21	1419,29	951,793
№	Параметр	Ед. измерения	Месяц					
			7	8	9	10	11	12
			Производство энергии на ТЭС при неработающей ВЭС					
1	$W_{ТЭС}$	МВт·ч	11904	11904	11520	11904	11520	11904
2	$B_{ТЭС}$	т.у.т.	3727,14	3727,14	3606,91	3727,14	3606,91	3727,14
			Производство энергии ВЭС					
3	$V_{Ветер}$	м/с	4,53	4,49	4,87	6,35	6,87	7,03
4	$W_{ВЭС}$	МВт·ч	1288,25	1254,42	1549	3548,34	4348,45	4814,71
			Процент замещения ТЭС					
5	μ_1	%	10,822	10,5378	13,4462	29,808	37,7469	40,4462
			Производство энергии на ТЭС при работе ВЭС					
6	$W_{общ}$	МВт·ч	10615,8	10649,6	9971	8355,66	7171,55	7089,29
7	$B_{общ}$	т.у.т.	3323,79	3334,38	3121,92	2616,16	2245,41	2219,66
			Количество сэкономленного топлива за счёт работы ВЭС					
8	$B_{топл}$	т.у.т.	403,35	392,759	484,991	1110,99	1361,5	1507,49
9	M_{CO2}	т.	1030,56	1003,5	1239,15	2838,57	3478,63	3851,63

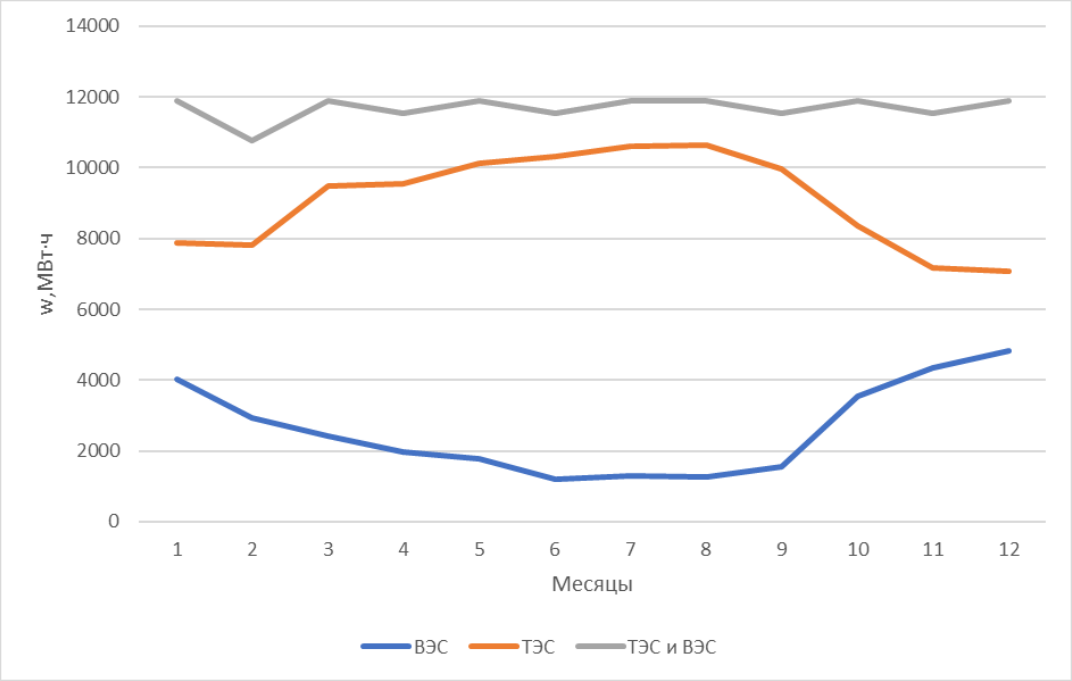


Рисунок 1 – Количество энергии производимой ТЭС, ВЭС и ТЭС совместно с ВЭС

Список использованных источников:

1. Приказ Минэнерго России от 29.11.2024 № 2328 от «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025 – 2030 годы» – С.84.

2. Исаев А.С. Оптимизационные задачи электроэнергетики / Исаев А.С // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации, 2023 – С.181–193.

3. Гиршин С. С. Методы расчета и оптимизация режимов электроэнергетических систем / Гиршин С. С., Румянцева Е. В., Прусс , С. Ю. Петрова Е. В., Горюнов В. Н.// учебное пособие Омский государственный технический университет, 2023 – С.81–82.

4. Бербенец С.В. Математические методы оптимизации режимов энергосистемы / Бербенец С.В., Сошникова К.Д., Гулай Т.А. // Инновационные подходы в решении научных проблем, сборник трудов по материалам Международного конкурса научно-исследовательских работ. Уфа, 2020 – С.64–69.

5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.02.2024 № 444-р – С.1–3.

6. Росляков П.В. Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных теплоэлектростанций в контексте развития углеродного регулирования в Российской Федерации/ Росляков П.В., Скобелев Д.О., Доброхотова М.В.,Гусева Т.В.// Журнал «Уголь», 2023 – С.84–88.

7. Группа Компаний «КемУглеСбыт» : сайт. Москва. URL: https://kemuglesbit.ru/catalog (дата обращения: 26.11.2025)

8. Такайшвили Л.Н. Тенденции и перспективы использования энергетических углей Восточной Сибири/ Такайшвили Л.Н., Агафонов Г.В.// Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг Георесурсов, 2022 – С.15–28.

9. Вишневецкая Я.Г. Снижение влияния ТЭС на окружающую среду при сжигании пылевидного угля/ Вишневецкая Я.Г.// Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве, Материалы III Международной научной конференции. Макеевка, 2025 – С.532–534.

10. Каратаев А.Т. Разработка технологий использования солнечных, ветровых электроустановок/ Каратаев А.Т., Исомидин Кызы К.// журнал Известия Ошского Технологического Университета, номер 4,2023 – С.18–24.

11. Черняев Д.М. Эффективность современных энергоустановок ТЭС/ Черняев Д.М.// журнал Вопросы устойчивого развития общества, номер 2, 2020 – С.642–652.

12. Халиулина К.Р. Актуальные способы снижения выбросов диоксида углерода из уходящих газов ТЭС/ Халиулина К.Р., Бабиков О.Е.// Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве, Материалы IX Национальной научно-практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ. Казань, 2024 – С.422–424.

13. Федоров, Ю. В. Моделирование режимов работы ВЭС в системах сельскохозяйственного электроснабжения / Ю. В. Федоров, А. К. Сокольский // Инновации в сельском хозяйстве,2014. – № 1(6). – С. 65-68.

14. Волошин Е.А. Исследование балансов мощности при внедрении возобновляемых источников энергии и накопителей электрической энергии в электрическую сеть/ Волошин Е.А., Онисова О.А., Наволочный А.А.// Вестник Московского Энергетического Института, номер 3, 2022 – С.11–22.

Bibliography

1. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 11/29/2024 No. 2328 dated "On Approval of the Scheme and Program for the Development of Russian Electric Power systems for 2025-2030" – P. 84.

2. Isaev A.S. Optimization tasks of the electric power industry / Isaev A.S. // Modern science: current issues, achievements and innovations, 2023 – Pp.181-193.

3. Girshin S. S. Methods of calculation and optimization of modes of electric power systems / Girshin S. S., Rumyantseva E. V., Pruss, S. Y. Petrova E. V., Goryunov V. N.// textbook Omsk State Technical University, 2023 – Pp.81-82.

4. Berbenets S.V. Mathematical methods for optimizing power system modes / Berbenets S.V., Soshnikova K.D., Gulai T.A. // Innovative approaches in solving scientific problems, proceedings based on the materials of the International Competition of scientific research papers. Ufa, 2020– Pp.64-69.

5. Decree of the Government of the Russian Federation dated 02/28/2024 No. 444-r –P.1-3.

6. Roslyakov P.V. Assessment of greenhouse gas emissions for coal–fired thermal power plants in the context of the development of carbon regulation in the Russian Federation/ Roslyakov P.V., Skobelev D.O., Dobrokhotova M.V.,Guseva T.V.// Ugol Magazine, 2023 – Pp.84-88.

7. KemUgleSbyt Group of Companies : website. Moscow. URL: https://kemuglesbit.ru/catalog (date of request: 12.02.2025)

8. Takaishvili L.N. Trends and prospects in the use of energy coals in Eastern Siberia/ Takaishvili L.N., Agafonov G.V.// Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering, 2022 – Pp.15-28.

9. Vishnevetskaya Ya.G. Reducing the impact of thermal power plants on the environment when burning pulverized coal/ Vishnevetskaya Ya.G.// Problems of technosphere and environmental safety in industry, construction and urban economy, Proceedings of the III International Scientific Conference. Makeyevka, 2025, Pp.532-534.

10. Karataev A.T. Development of technologies for the use of solar and wind electrical installations/ Karataev A.T., Isomidin Kyzy K.// Izvestiya Osh Technological University Journal,

issue 4.2023 – Pp.18-24.

11. Chernyaev D.M. Efficiency of modern thermal power plants/ Chernyaev D.M.// Journal of Issues of Sustainable development of society, No. 2, 2020 – Pp.642-652.

12. Khaliulina K.R. Actual ways to reduce carbon dioxide emissions from exhaust gases of thermal power plants/ Khaliulina K.R., Babikov O.E.// Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services, Proceedings of the IX National Scientific and Practical Conference dedicated to the 55th anniversary of the KGEU. Kazan, 2024 – Pp.422-424.

13. Fedorov, Yu.V. Modeling of WPP operation modes in agricultural power supply systems / Yu. V. Fedorov, A. K. Sokolsky // Innovations in agriculture, 2014. – № 1(6). – Pp. 65-68.

14. Voloshin E.A., Onisova O.A., Navolochny A.A. A study of power balances in the implementation of renewable energy sources and electric energy storage in the electric grid// Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute, No. 3, 2022 – Pp.11-22.

Кравец Вячеслав Васильевич, студент 1-го курса магистратуры, Крымский Федеральный Университет имени В.И.Вернадского, Симферополь, Российская Федерация, e-mail: kravec12022004@gmail.com

Бекиров Эскендер Алимович, заведующий кафедры Электроэнергетики и Электротехники, д.т.н., профессор, Крымский Федеральный Университет имени В.И.Вернадского, Симферополь, Российская Федерация, e-mail: bekirov.e.a@cfuv.ru

ANALYSIS OF THE JOINT OPERATION OF THERMAL AND WIND POWER PLANTS ON THE COMMON GRID OF THE ENERGY SYSTEM

V.V. Kravets, E.A. Bekirov
Crimean Federal University

Abstract. An energy system containing thermal and wind power plants in its composition is considered. The combined use of traditional and renewable energy sources for electricity generation reduces environmental damage, while at the same time reducing the number of problems existing in energy systems with only WES, such as the dependence of electricity production on wind speed and others. The calculation of electricity generation and fuel consumption by a thermal power plant with a non-functioning and operating wind power plant is performed. The data obtained is summarized in a table. Based on the data obtained, a graph has been constructed showing the dependence of electricity generation at thermal power plants, depending on the operation of the WES, during the year. The amount of money saved on fuel for a thermal power plant (26,117,338 rubles) and the amount of carbon dioxide not released into the atmosphere (25,154.2 tons) during the joint operation of thermal and wind power plants is given.

Keywords: electric power, wind farms, thermal power plants, energy efficiency, Lagrange's theorem

Vyacheslav Vasilyevich Kravets, 1st year graduate student, Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation, e-mail: kravec12022004@gmail.com

Eskender Alimovich Bekirov, Head of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation, e-mail: bekirov.e.a@cfuv.ru

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ ВОДОРОДНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГИБРИДНОГО КОМПЛЕКСА ФЭУ–ВЭУ–H_2 ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ АПК

Мерием Слиманоу

Тамбовский государственный технический университет, г.Тамбов, Россия

Аннотация. *Исследуется водородная подсистема (электролизёр – резервуар – топливный элемент) гибридного энергокомплекса на основе фотоэлектрических установок (ФЭУ), ветроэнергетических установок и водородной энергетики, предназначенного для энергоснабжения насосных станций систем орошения в агропромышленном комплексе (АПК). Предложена квазистационарная энергетическая модель подсистемы водородного накопителя, в которой мощности электролизёра и топливного элемента принимаются равными заданным уставкам, а изменение степени заряженности резервуара описывается уравнением баланса энергии. Для учёта инерционных свойств электрохимических преобразователей построена динамическая модель первого порядка по мощности электролизёра и топливного элемента. На основе численных экспериментов для характерного суточного режима работы гибридного комплекса выполнено сопоставление квазистационарной и динамической моделей по мгновенным значениям мощности и степени заряженности резервуара. Показано, что максимальные относительные ошибки по мощности не превышают 1,47 и 0,63 %, а максимальная ошибка по степени заряженности составляет не более 0,33 % шкалы, что существенно ниже порогового уровня 3 %. Сформулированы выводы о применимости квазистационарной модели для ускоренного моделирования и технико-экономического анализа гибридных энергосистем АПК.*

Ключевые слова: *агропромышленный комплекс, насосные станции орошения, гибридный энергокомплекс, фотоэлектрическая установка, ветроэнергетическая установка, водородная подсистема, электролизёр, топливный элемент, квазистационарная модель, динамическая модель.*

Введение. Агропромышленный комплекс (АПК) относится к числу наиболее энергоёмких отраслей, при этом значительная часть сельскохозяйственных предприятий и объектов водоснабжения расположена вдали от мощных центров генерации и развивается в условиях ограниченной пропускной способности сельских электрических сетей. Для таких потребителей актуальны децентрализованные решения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и гибридных энергетических комплексов, способных обеспечить надёжное и экономически приемлемое электроснабжение при переменных метеоусловиях и нагрузке. В работах Баранова и Крюкова показано, что комбинированные системы с использованием ветровой и солнечной генерации, дополненной резервным источником, позволяют обеспечить устойчивое энергоснабжение удалённых сельских потребителей в условиях отсутствия развитой сетевой инфраструктуры [1].

Развитие методов цифрового моделирования и концепции «цифровых двойников» открывает дополнительные возможности для оптимизации состава и режимов работы гибридных энергосистем. Тягунов и Шевердиев продемонстрировали, что применение

цифрового двойника гибридного энергокомплекса с ВИЭ и накопителями энергии, включая водородные, позволяет повысить эффективность выбора конфигурации установки и режимов её эксплуатации на всех этапах жизненного цикла, в том числе для изолированных объектов и фермерских хозяйств [2]. На уровне отраслевых решений анализ перспектив использования гибридных энергетических комплексов в сельском хозяйстве Беларуси, выполненный Кравцовым и соавт., подтверждает интерес агропредприятий к объединению местных ВИЭ (солнечных, ветровых, биогазовых) с традиционными энергоисточниками и тепловыми насосами для повышения энергоэффективности и энергосбережения в АПК [3].

Отдельной задачей при проектировании гибридных установок является выбор типа и параметров подсистемы накопления энергии. В работе Тягунова и Шевердиева показано, что режимы работы ветро-солнечного энергоузла и характер нагрузки определяют оптимальный выбор между различными накопителями (аккумуляторными батареями, водородными накопителями, суперконденсаторами) и их ёмкостью, что критично для обеспечения надёжного электроснабжения автономных потребителей [4]. Это подчёркивает необходимость корректного моделирования динамики подсистем хранения энергии, в том числе водородных, в составе гибридных комплексов.

Зарубежные исследования подтверждают высокую перспективность гибридных систем на основе ВИЭ и водорода для энергоснабжения сельских территорий. В работе Oymak и Tur рассмотрен автономный гибридный комплекс PV/ ВЭУ /H_2 с электролизёром, резервуаром и топливным элементом для декарбонизации энергоснабжения сельского поселения в Турции; показано, что при оптимальном управлении такая система способна полностью покрывать энергопотребление посёлка, минимизируя использование дизельного топлива и выбросы CO_2 [5]. Rekioua и соавт. предложили «умную» гибридную PV–ветровую систему для питания сельского водяного насоса, использующую интеллектуальные алгоритмы управления для обеспечения устойчивой подачи воды на нужды ирригации в средиземноморском регионе [6]. Особый интерес для задач АПК представляют работы, посвящённые энергоснабжению оросительных систем. Ge и соавт. рассмотрели оптимальную конфигурацию автономной гибридной системы PV/ ВЭУ /H_2 с подсистемой охлаждения для орошения сельхозугодий в пустынном регионе, показав, что интеграция водородного накопителя позволяет круглосуточно обеспечивать энергией системы капельного орошения при минимальной стоимости энергии и соблюдении требований надёжности [7]. В исследовании Anjum и соавт. выполнен технико-экономический анализ гибридной PV– ВЭУ –топливный элемент системы для энергоснабжения сельского жилищного комплекса в Бангладеш; продемонстрировано, что при достаточном возобновляемом ресурсе такая система может надёжно покрывать спрос на электроэнергию как в сетевом, так и в изолированном режимах [8].

Проведённый анализ российских и зарубежных публикаций позволяет заключить, что актуальность гибридных комплексов на основе ВИЭ и водородных технологий для энергоснабжения сельских потребителей, в том числе насосных станций оросительных систем. В большинстве работ основное внимание уделяется выбору конфигурации оборудования, оценке годовых и сезонных энергобалансов и технико-экономической оптимизации на основе квазистационарных или укрупнённых моделей [2–5,7,8]. При этом динамические свойства водородной подсистемы (электролизёр, топливный элемент, резервуар H_2), её взаимодействие с системой управления энергобалансом и влияние инерционности изменения мощности на точность квазистационарных энергетических

моделей, как правило, рассматриваются упрощённо и не выделяются в качестве самостоятельного объекта анализа [4–7].

В этой связи актуальной и недостаточно изученной является задача количественной оценки области применимости квазистационарной аппроксимации водородной подсистемы в составе гибридных комплексов ФЭУ– ВЭУ –H_2, ориентированных на нужды АПК. Цель настоящей работы заключается в сопоставлении квазистационарной энергетической модели и динамической модели первого порядка для подсистемы водородного накопителя гибридного комплекса, предназначенного для энергоснабжения насосных станций систем орошения, с определением максимальных и среднеквадратических ошибок по мощности электролизёра и топливного элемента, а также по степени заряженности резервуара и формулировкой практических критериев допустимой аппроксимации.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования в настоящей работе является водородная подсистема гибридного энергокомплекса на основе фотоэлектрических установок (ФЭУ), ветроэнергетических установок и водородной энергетики, предназначенного для энергоснабжения насосных станций систем орошения в агропромышленном комплексе. Такой комплекс позволяет повысить долю использования возобновляемых источников энергии, снизить нагрузку на сельские электрические сети и обеспечить требуемую надёжность электроснабжения электрооборудования насосов. Водородная подсистема включает электролизёр, резервуар для хранения водорода и топливный элемент. На вход подсистемы подаются уставки мощности электролизёра $P_{el,cmd}(t)$ и топливного элемента $P_{fc,cmd}(t)$ формируемые системой управления энергобалансом гибридного комплекса. На выходе формируются фактические значения мощности электролизёра $P_{el}(t)$, мощности топливного элемента $P_{fc}(t)$, а также степень заряженности резервуара водорода SoC(t), характеризующая относительный запас аккумулированной энергии в диапазоне [0; 1]. В составе цифрового двойника гибридного комплекса подсистема водородного накопителя рассматривается как управляемый накопитель энергии, связанный с ФЭУ, ветроустановками, преобразовательной техникой и насосной нагрузкой через общую шину постоянного тока и сельскую электрическую сеть; остальные подсистемы описываются укрупнённо и используются прежде всего для формирования уставок мощности.

В задачах технико-экономического анализа и размерного выбора оборудования гибридных энергосистем широко используются квазистационарные энергетические модели, в которых предполагается, что динамика отдельных подсистем значительно быстрее изменения уставок мощности и внешних воздействий. Для водородной подсистемы такое допущение означает, что фактическая мощность электролизёра и топливного элемента практически совпадает с заданной во времени уставкой: $P_{el}(t) \approx P_{el,cmd}(t)$, $P_{fc}(t) \approx P_{fc,cmd}(t)$. В рамках квазистационарной аппроксимации мощности принимаются строго равными уставкам:

$$P_{\text{el,QSS}}(t) = P_{\text{el,cmd}}(t), P_{\text{fc,QSS}}(t) = P_{\text{fc,cmd}}(t),$$

и модель по мощности сводится к системе алгебраических соотношений. Изменение степени заряженности резервуара при этом описывается уравнением баланса мощности с учётом коэффициентов полезного действия электролизёра η_{el} и топливного элемента η_{fc} , а также приведённого объёма (ёмкости) резервуара V_{tank}:

$$\frac{d\,\text{SoC}_{\text{QSS}}(t)}{dt} = \frac{1}{V_{\text{tank}}}\left(\eta_{\text{el}}\,P_{\text{el,QSS}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{fc}}}\,P_{\text{fc,QSS}}(t)\right),$$

при ограничении SoCQSS(t) в диапазоне [0; 1]. По сути данное уравнение является

записью закона сохранения энергии для резервуара водорода в относительных единицах и получено непосредственно из баланса мощности между электролизёром, топливным элементом и накопителем. Квазистационарная модель обладает малой вычислительной трудоёмкостью и далее используется как базовая аппроксимация при оценке её применимости по сравнению с более детализированным динамическим описанием.

Для более строгого учёта инерционных свойств электролизёра и топливного элемента применяется динамическая модель первого порядка, ограничивающая скорость изменения их мощности. В этом случае фактические мощности описываются линейными дифференциальными уравнениями вида

$$\tau_{\text{el}} \frac{dP_{\text{el}}(t)}{dt} + P_{\text{el}}(t) = P_{\text{el,cmd}}(t), \tau_{\text{fc}} \frac{dP_{\text{fc}}(t)}{dt} + P_{\text{fc}}(t) = P_{\text{fc,cmd}}(t),$$

где τ_{el} и τ_{fc} — постоянные времени электролизёра и топливного элемента соответственно. Эти уравнения представляют собой типовую аппроксимацию инерционного звена первого порядка, широко используемую для описания плавного изменения мощности энергетического оборудования. Степень заряженности резервуара в динамической модели определяется тем же балансом мощности, что и для квазистационарной аппроксимации, но с использованием фактических динамических мощностей:

$$\frac{d\,\text{SoC}_{\text{dyn}}(t)}{dt} = \frac{1}{V_{\text{tank}}}\left(\eta_{\text{el}}\, P_{\text{el}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{fc}}} P_{\text{fc}}(t)\right),$$

с ограничением $\text{SoC}_{\text{dyn}}(t)$ в пределах [0; 1] путём насыщения при достижении граничных значений. В численных экспериментах постоянные времени приняты равными τ_{el} =0,8 с и τ_{fc}=0,5 с, что отражает более высокую инерционность электролизёра по сравнению с топливным элементом и согласуется с характерными временными масштабами изменения мощности в рассматриваемом гибридном комплексе. Тем самым динамическая модель трактуется как авторская математическая постановка, основанная на стандартном представлении инерционного звена первого порядка и предварительных настроечных расчётах.

Сопоставление квазистационарной и динамической моделей подсистемы водородного накопителя выполнялось в рамках численного эксперимента, имитирующего типичный режим работы гибридного комплекса ФЭУ– ВЭУ –H_2 при энергоснабжении насосных станций. Уставки мощности электролизёра и топливного элемента задавались в виде синусоидальных зависимостей вокруг базовых уровней:

$$P_{\text{el,cmd}}(t) = P_{0,\text{el}} + A_{\text{el}}\sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{el}}}\right), P_{\text{fc,cmd}}(t) = P_{0,\text{fc}} + A_{\text{fc}}\sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{fc}}}\right),$$

Где $P_{0,\text{el}} = 5$ кВт, $A_{\text{el}} = 3$ кВт, $P_{0,\text{fc}} = 3$ кВт, $A_{\text{fc}} = 2$ кВт, а периоды изменения мощности составляли T_{el}=120 с и T_{fc}=180 с. Отрицательные значения уставок отсекались снизу, что отражает невозможность потребления или генерации отрицательной мощности:

$$P_{\text{el,cmd}}(t) \geq 0, P_{\text{fc,cmd}}(t) \geq 0.$$

Длительность моделирования принималась равной t_{end}=360 с при шаге интегрирования dt=0,05 с. Для исключения влияния начального переходного процесса при расчёте количественных показателей точности рассматривался интервал времени $t \geq t_{\text{skip}}$ где $t_{\text{skip}} = 5$ с.

Качество квазистационарной аппроксимации оценивалось по максимальной и среднеквадратической относительным ошибкам мощности электролизёра и топливного элемента, а также по максимальной абсолютной ошибке степени заряженности резервуара.

Относительные ошибки по мощности вычислялись в процентах от номинальных значений, принятых равными максимальному значению уставок на рассматриваемом интервале; максимальная ошибка мощности электролизёра $\varepsilon_{P,\mathrm{el,max}}$ и среднеквадратическая ошибка $\varepsilon_{P,\mathrm{el,RMSE}}$ определялись по сравнению с динамической моделью, аналогично для топливного элемента ($\varepsilon_{P,\mathrm{fc,max}}$, $\varepsilon_{P,\mathrm{fc,RMSE}}$). Максимальная ошибка по степени заряженности $\varepsilon_{\mathrm{SoC,max}}$ выражалась в процентах шкалы [0; 1] и характеризовала наибольшее расхождение между $\mathrm{SoC}_{\mathrm{dyn}}(t)$ и $\mathrm{SoC}_{\mathrm{QSS}}(t)$ после завершения переходного процесса. Эти показатели далее используются для количественной оценки области применимости квазистационарной аппроксимации подсистемы водородного накопителя.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены результаты моделирования водородной подсистемы по динамической модели и по квазистационарной аппроксимации. На верхнем графике показаны временные зависимости мощности электролизёра и топливного элемента, на нижнем – изменение степени заряженности резервуара водорода SoC. Из верхнего графика видно, что по динамической модели фактическая мощность электролизёра плавно следует за уставкой, демонстрируя небольшое запаздывание и сглаживание максимумов и минимумов. Кривая по квазистационарной модели при этом практически совпадает с заданным сигналом, так как инерционные свойства не учитываются. Аналогичная картина наблюдается для мощности топливного элемента: динамическая модель описывает плавное изменение мощности, тогда как квазистационарная аппроксимация воспроизводит уставку без заметной задержки.

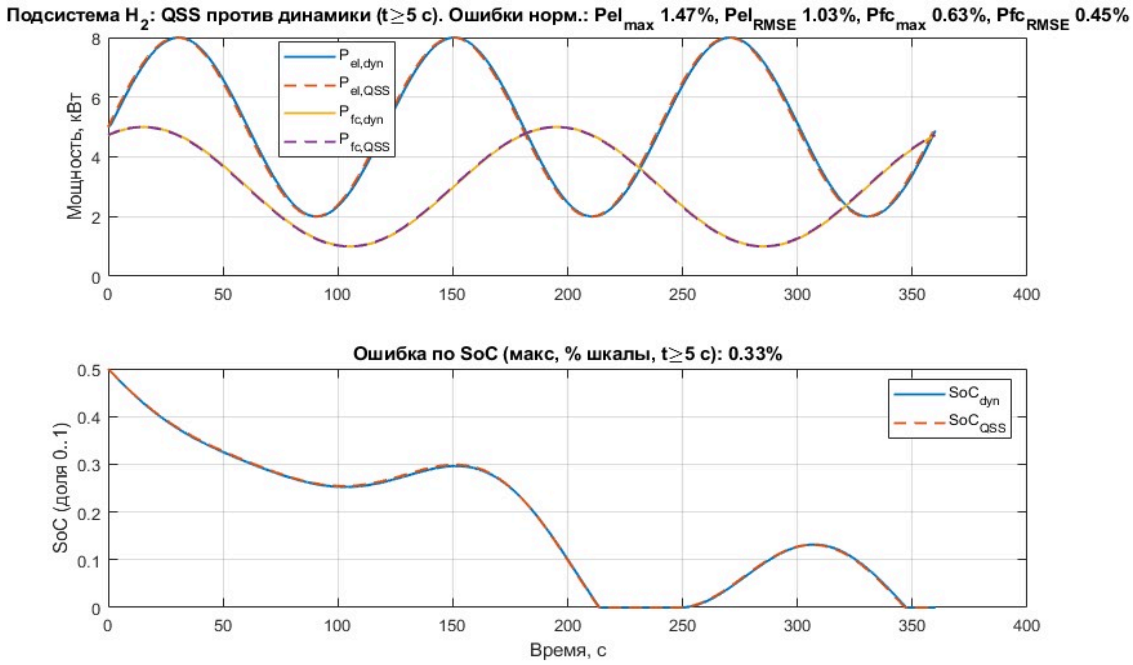


Рисунок 1 – Подсистема водородного накопителя гибридного комплекса ФЭУ–ветер–H_2: сопоставление квазистационарной аппроксимации и динамической модели по мощности электролизёра и топливного элемента (верхний график) и степени заряженности резервуара SoC (нижний график).

Нижний график рис. 1 демонстрирует, что траектории степени заряженности резервуара, рассчитанные по динамической и квазистационарной моделям, практически совпадают на всём интервале моделирования. Незначительные расхождения наблюдаются лишь в периоды наиболее интенсивного заряда и разряда, однако визуально они малы. Это объясняется интегральным характером показателя SoC: кратковременные различия по

мгновенной мощности сглаживаются при интегрировании и слабо влияют на общую динамику изменения запаса водорода. Таким образом, качественный анализ временных зависимостей показывает, что при выбранных значениях постоянных времени подсистемы ВН и характерных периодах изменения уставок мощности квазистационарная аппроксимация достаточно хорошо воспроизводит поведение динамической модели как по мощности, так и по степени заряженности резервуара.

Количественные показатели точности квазистационарной аппроксимации относительно динамической модели приведены в табл. 1. Анализ выполнялся для интервала времени $t \geq 5$ с, то есть после окончания начального переходного процесса, а относительные ошибки по мощности рассчитывались в процентах от номинальных значений, принятых равными максимальным уставкам мощности электролизёра и топливного элемента.

Таблица 1 – Показатели ошибок квазистационарной аппроксимации подсистемы ВН после завершения переходного процесса ($t \geq 5$ с)

Показатель	Значение, %
Максимальная относительная ошибка мощности ЭЛ	1,47
Среднеквадратическая ошибка мощности ЭЛ	1,03
Максимальная относительная ошибка мощности ТЭ	0,63
Среднеквадратическая ошибка мощности ТЭ	0,45
Макс. ошибка степени заряженности резервуара SoC	0,33

Из табл. 1 следует, что максимальная относительная ошибка мощности электролизёра составляет 1,47 %, а среднеквадратическая ошибка — 1,03 %. Для мощности топливного элемента соответствующие значения равны 0,63 и 0,45 %. Максимальная абсолютная ошибка степени заряженности резервуара не превышает 0,33 % шкалы [0; 1]. Все приведённые значения заметно ниже порогового уровня 3 %, принятого в работе в качестве допустимого критерия аппроксимации для задач расчёта и технико-экономического анализа.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в рассматриваемых условиях, характерных для работы гибридного комплекса ФЭУ–ветер–H_2 при энергоснабжении насосных станций, квазистационарная модель водородной подсистемы обеспечивает достаточно высокую точность по сравнению с динамической моделью. Невязки по мощности, обусловленные инерционностью электролизёра и топливного элемента, оказывают ограниченное влияние как на мгновенные значения мощности, так и на оценку степени заряженности резервуара. С практической точки зрения это позволяет использовать квазистационарную аппроксимацию в задачах ускоренного моделирования, построения карт размерного выбора по мощности электролизёра, топливного элемента и объёму резервуара, а также при постановке задач технико-экономической оптимизации гибридного комплекса. При анализе быстропротекающих переходных процессов, показателей качества электроэнергии и динамического взаимодействия с электрической сетью целесообразно применять полную динамическую модель, учитывающую инерционные свойства подсистемы ВН.

Выводы.

1. В работе рассмотрена водородная подсистема гибридного энергокомплекса на основе фотоэлектрических установок, ветроэнергетических установок и водородного

накопителя, предназначенного для энергоснабжения насосных станций систем орошения в АПК. Для подсистемы ВН предложена согласованная пара моделей: квазистационарная энергетическая модель и динамическая модель первого порядка, учитывающая инерционность изменения мощности электролизёра и топливного элемента.

2. На основе уравнений баланса мощности и типовой аппроксимации инерционного звена первого порядка получены математические зависимости для мощности электролизёра и топливного элемента, а также для степени заряженности резервуара водорода. Проведённый численный эксперимент при характерных для гибридного комплекса режимах работы (синусоидальные изменения уставок мощности, длительность моделирования 360 с, исключение первых 5 с переходного процесса) позволил сопоставить результаты квазистационарной и динамической моделей.

3. Показано, что максимальные относительные расхождения по мощности электролизёра и топливного элемента не превышают 1,47 и 0,63 % соответственно, а среднеквадратические ошибки составляют 1,03 и 0,45 %. Максимальная ошибка по степени заряженности резервуара не превышает 0,33 % шкалы. Все полученные значения находятся значительно ниже заданного порогового уровня 3 %, что позволяет считать квазистационарную аппроксимацию достаточно точной для рассматриваемых режимов работы подсистемы ВН.

4. Результаты исследования подтверждают применимость квазистационарной модели водородной подсистемы для задач ускоренного моделирования, построения карт размерного выбора по параметрам мощности электролизёра, топливного элемента и объёма резервуара, а также для постановки технико-экономической оптимизации гибридных энергокомплексов, ориентированных на нужды АПК. При решении задач анализа быстропротекающих переходных процессов, оценки показателей качества электроэнергии и взаимодействия с электрической сетью целесообразно использовать динамическую модель первого порядка.

5. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение набора сценариев нагрузки и генерации (включая реальные графики работы насосных станций и изменчивость ресурсов ВИЭ), учёт дополнительных ограничений по режимам работы электрооборудования и интеграция рассмотренных моделей подсистемы ВН в состав полномасштабного цифрового двойника гибридного комплекса для комплексной оценки режимов и показателей эффективности его применения в агропромышленном комплексе.

Список использованных источников:

1. Баранов Н. Н., Крюков К. В. Разработка системы управления гибридного электроэнергетического комплекса, в состав которого входят нетрадиционные и возобновляемые источники энергии разных типов // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 4. С. 72–81.

2. Тягунов М. Г., Шевердиев Р. П. Использование цифрового двойника гибридных энергетических комплексов для оптимизации их параметров и режимов // Вестник МЭИ. 2023. № 3. С. 109–118.

3. Кравцов А. М., Гаркуша К. Э., Грушин В. С., Пучко Ю. В. Перспективы использования гибридных энергетических комплексов в сельском хозяйстве // Энергетика и энергосбережение в АПК: материалы Международной научно-практической конференции. Минск: БГАТУ, 2022. С. 138–142.

4. Тягунов М. Г., Шевердиев Р. П. Влияние режимов работы гибридных энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии на определение

типа аккумуляторов энергии // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 62–70.

5. Oymak A., Tur M. R. Decarbonizing Rural Off-Grid Areas Through Hybrid Renewable Hydrogen Systems: A Case Study from Turkey // Processes. 2025. Vol. 13, No. 9. P. 2909.

6. Rekioua D., Rekioua T., Mokrani Z., Mezzai N., Oubelaid A., Kakouche K. Smart hybrid PV–wind energy system for sustainable agricultural water pumping in Mediterranean region // Turkish Journal of Electromechanics & Energy. 2025. Vol. 10, No. 1. Pp. 18–24.

7. Ge L., Liu J., Wang Z., Rafiq M. U. Optimal Configuration of Off-grid Hybrid Renewable Energy System with PV/Wind/Hydrogen/Cooling for an Agriculture and Irrigation Area: Case Study in Dongola // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2025. Vol. 11, No. 5. Pp. 2048–2057.

8. Anjum T., Mahmud M. A. P., Kumar L., El Haj Assad M., Ehyaei M. A. Feasibility analysis of hybrid photovoltaic, wind, and fuel cell systems for on–off-grid operations for the Ashrayan-3 housing project // Energy Science & Engineering. 2024. Vol. 12. Pp. 3476–3504.

Мерием Слиманоу
Тамбовский государственный технический университет, г.Тамбов, Россия
Slimanou.meriem@gmail.com

MODELLING AND ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF A QUASI-STATIONARY MODEL OF THE HYDROGEN SUBSYSTEM OF A PV–WIND–H_2 HYBRID SYSTEM FOR POWER SUPPLY OF IRRIGATION PUMPING STATIONS

Meriem Slimanou
Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Annotation. The paper considers the hydrogen subsystem (electrolyser – storage tank – fuel cell) of a hybrid energy system based on photovoltaic (PV) and wind power units with hydrogen storage, intended for the power supply of irrigation pumping stations in the agro-industrial sector. A quasi-stationary energy model of the hydrogen storage subsystem is proposed, in which the powers of the electrolyser and the fuel cell are assumed to be equal to the prescribed setpoints, while the state of charge of the hydrogen tank is described by an energy balance equation. To account for the inertial properties of the electrochemical converters, a first-order dynamic model of the electrolyser and fuel cell power is developed. Numerical simulations for a representative operating scenario of the hybrid system are used to compare the quasi-stationary and dynamic models in terms of instantaneous power and state-of-charge trajectories. It is shown that the maximum relative power errors do not exceed 1.47 % and 0.63 %, while the maximum state-of-charge error is below 0.33 % of the scale, which is significantly lower than the 3 % acceptability threshold. The obtained results confirm the applicability of the quasi-stationary model for fast simulations and techno-economic analysis of hybrid energy systems for agricultural applications.

Key words: agro-industrial complex, irrigation pumping stations, hybrid energy system, photovoltaic unit, wind turbine, hydrogen subsystem, electrolyser, fuel cell, quasi-stationary model, dynamic model.

Meriem Slimanou
Tambov State Technical University, Tambov, Russia
Slimanou.meriem@gmail.com

УДК 621.313

СУТОЧНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО КОМПЛЕКСА С ВОДОРОДНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ОРОШЕНИЯ

Мерием Слиманоу [1], Калинин Вячеслав Федорович

[1,2] Тамбовский государственный технический университет, г.Тамбов, Россия

Аннотация. *Рассматривается гибридный энергетический комплекс для энергоснабжения насосной станции орошения, включающий фотоэлектрическую установку (ФЭУ), ветроэнергетическую установку (ВЭУ), водородный накопитель энергии (электролизёр, топливный элемент и резервуар водорода) и присоединение к сельской электрической сети. На основе математической модели выполнен суточный энергетический анализ работы комплекса при заданном графике включения насосной станции. Построены зависимости мощностей ФЭУ, ВЭУ, электролизёра, топливного элемента и нагрузки, а также напряжения шины постоянного тока и степени заряда водородного накопителя. Показано перераспределение потоков энергии в течение суток и разгрузка электрической сети в часы пиковой нагрузки. Проведено сравнение с базовым вариантом без водородного накопителя по суточному потреблению электроэнергии из сети и доле покрытия нагрузки за счёт возобновляемых источников энергии. Установлено, что применение водородного накопителя позволяет повысить долю ВИЭ в энергобалансе насосной станции и уменьшить зависимость от сети, что перспективно для энергообеспечения объектов орошения в удалённых сельских районах.*

Ключевые слова: *орошение, насосная станция, гибридный энергетический комплекс, фотоэлектрическая установка, ветроэнергетическая установка, водородный накопитель энергии, суточный энергобаланс.*

Введение. Системы орошения являются одним из наиболее энергоёмких элементов агропромышленного комплекса и существенно влияют на себестоимость сельскохозяйственной продукции. Насосные станции орошения, как правило, подключены к протяжённым сельским электрическим сетям с ограниченной пропускной способностью и значительными потерями, что приводит к росту затрат на электроэнергию и снижению надёжности энергоснабжения потребителей АПК. В этих условиях особую актуальность приобретает использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и децентрализованных систем энергоснабжения, ориентированных на конкретные сельскохозяйственные объекты.

Отечественные исследования показывают, что солнечные энергетические системы могут эффективно применяться для энергоснабжения индивидуальных потребителей и малых аграрных объектов при условии использования высокоэффективных фотоэлектрических модулей и современных систем управления [1]. Анализ потенциала солнечной энергетики в России и странах Центральной Азии свидетельствует о возможности широкого внедрения солнечных систем возобновляемой энергетики, в том числе для сельскохозяйственных потребителей [2]. Отмечается и рост конкурентоспособности солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ при повышении тарифов на

традиционную энергию и снижении капитальных затрат на ВИЭ [3]. Вопросы повышения эффективности солнечных энергетических установок за счёт совершенствования конструкции и локализации солнечной энергии подробно рассмотрены в работах [4].

Системный подход к энергоснабжению сельскохозяйственных потребителей на основе рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов обоснован в диссертационных исследованиях по специальности «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» [5]. Отмечается необходимость учёта пространственно-временной неравномерности нагрузок, климатических условий и структуры энергоресурсов при выборе конфигурации системы энергоснабжения. Для удалённых объектов АПК предложены различные варианты автономных и гибридных установок, в том числе установки электроснабжения удалённых объектов с использованием солнечных термоэлектрических генераторов [6], что подтверждает целесообразность комбинирования разных видов ВИЭ и различных типов преобразователей.

На международном уровне активно исследуются гибридные системы «ФЭУ–ВЭУ» для водоподъёма и орошения. В работе [7] выполнено экспериментальное исследование гибридной фотоэлектрической и ветроэнергетической установки для поливного орошения в Турции и показана возможность замены дизель-генераторов при удовлетворительных технико-экономических показателях. В ряде исследований рассматриваются гибридные комплексы с электролизёром и накоплением энергии в виде водорода, в том числе off-grid системы «ФЭУ–ветер–аккумулятор–электролизёр», ориентированные на производство «зелёного» водорода [8]. Экономические аспекты получения водорода от комбинированных солнечно-ветровых станций, в том числе в конфигурациях on-grid / off-grid, анализируются, например, в [9].

Несмотря на существенный объём работ по ВИЭ и водородным технологиям, вопросы суточного энергобаланса гибридных комплексов «ФЭУ–ВЭУ–водородный накопитель–сеть» применительно к насосным станциям орошения, а также влияние водородной подсистемы на распределение энергопотоков и разгрузку сельской электрической сети изучены недостаточно. Особенно важен анализ в координатах реального суточного графика полива, когда насосная станция имеет выраженные утренние и вечерние интервалы работы.

Целью настоящей работы является суточный энергетический анализ гибридного комплекса ФЭУ–ВЭУ–водородный накопитель–сеть для энергоснабжения насосной станции орошения и оценка влияния водородной подсистемы на энергопотоки, режим напряжения шины постоянного тока и показатели использования ВИЭ в течение суток.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования рассматривается гибридный энергетический комплекс, предназначенный для энергоснабжения насосной станции орошения. Комплекс включает фотоэлектрическую установку (ФЭУ) номинальной мощностью $P_{PV,nom}$, ветроэнергетическую установку (ВЭУ) номинальной мощностью $P_{W,nom}$, выпрямительно-инверторный комплекс с общим звеном постоянного тока, насосную станцию орошения с частотно-регулируемым электроприводом (ЧРП), питаемым от шины постоянного тока через сетевой инвертор, водородный накопитель энергии, состоящий из электролизёра номинальной мощностью $P_{el,nom}$, топливного элемента номинальной мощностью $P_{fc,nom}$ и резервуара водорода объёмом V_{H2} , а также точку присоединения к сельской электрической сети низкого напряжения, обеспечивающую двусторонний обмен мощностью $P_{grid(t)}$.

Система управления комплексом ориентирована на максимальное использование энергии ФЭУ и ВЭУ для питания насосной станции, зарядку водородного накопителя при

наличии избыточной мощности ВИЭ, поддержание напряжения шины постоянного тока в допустимом диапазоне и минимизацию суточного потребления электроэнергии из сети при соблюдении ограничений по режимам работы оборудования.

Суточный сценарий работы комплекса моделируется на интервале времени t∈[0;24] ч с шагом Δt порядка одной минуты. Для каждого шага задаются профиль солнечной радиации и соответствующая мощность ФЭУ $P_{PV(t),}$ профиль скорости ветра и мощность ВЭУ $P_{W(t)}$, график мощности насосной станции $P_{\text{load}}(t)$, отражающий интервалы полива, а также возможные интервалы островного режима, когда питание нагрузки обеспечивается только за счёт ВИЭ и накопителя. Баланс мощности на шине постоянного тока описывается выражением

$$P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{W}}(t) + P_{\text{fc}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{el}}(t) + P_{\text{loss}}(t),$$

где $P_{\text{el}}(t)$– мощность, потребляемая электролизёром, $P_{\text{fc}}(t)$– мощность топливного элемента, $P_{\text{loss}}(t)$– суммарные потери в преобразовательных устройствах и электрических соединениях. Напряжение шины постоянного тока $U_{\text{dc}}(t)$рассчитывается с учётом динамики звена постоянного тока и алгоритмов управления инверторами; в рамках настоящей работы анализируется временной ход $U_{\text{dc}}(t)$и соблюдение допустимого диапазона напряжений.

Водородный накопитель энергии описывается квазистационарной моделью с учётом энергетической ёмкости резервуара и КПД преобразования. Степень заряда $\text{SoC}_{\text{H}_2}(t)$определяется уравнением

$$\frac{d\,\text{SoC}_{\text{H}_2}}{dt} = \frac{\eta_{\text{el}} P_{\text{el}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{fc}}} P_{\text{fc}}(t)}{E_{\text{cap}}},$$

где η_{el} и η_{fc}– КПД электролизёра и топливного элемента соответственно, E_{cap} – эквивалентная энергетическая ёмкость резервуара водорода. При этом выполняются ограничения

$$0 \le \text{SoC}_{\text{H}_2}(t) \le 1, 0 \le P_{\text{el}}(t) \le P_{\text{el,nom}}, 0 \le P_{\text{fc}}(t) \le P_{\text{fc,nom}}.$$

Для оценки работы комплекса используются интегральные показатели. Суточная энергия, потреблённая нагрузкой, определяется выражением

$$E_{\text{load}} = \int_0^{24} P_{\text{load}}(t)\, dt,$$

суточная энергия, потреблённая из сети,

$$E^{+}_{\text{grid}} = \int_{P_{\text{grid}}(t)>0} P_{\text{grid}}(t)\, dt,$$

суточная энергия, потреблённая и отданная водородной подсистемой,

$$E_{\text{el}} = \int_0^{24} P_{\text{el}}(t)\, dt\,, E_{\text{fc}} = \int_0^{24} P_{\text{fc}}(t)\, dt,$$

а доля покрытия суточной нагрузки за счёт ВИЭ и накопителя вычисляется как

$$\alpha = 1 - \frac{E^{+}_{\text{grid}}}{E_{\text{load}}}.$$

Для сравнения рассчитывается базовый вариант без водородного накопителя, в котором $P_{\text{el}}(t) = P_{\text{fc}}(t) = 0$; это позволяет количественно оценить эффект внедрения водородной подсистемы на показатели E^{+}_{grid}и α.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены результаты моделирования суточного сценария работы гибридного комплекса при энергоснабжении насосной станции

орошения. В верхнем поле показаны временные зависимости мощности фотоэлектрической установки и ветроэнергетической установки, электролизёра, топливного элемента и нагрузки; в среднем поле приведён график напряжения шины постоянного тока с указанием интервалов пуска ЧРП и возможного островного режима; в нижнем поле отображена динамика степени заряда водородного накопителя.

Из анализа верхнего поля рис. 1 видно, что в дневные часы суммарная мощность ФЭУ и ВЭУ существенно превышает потребность насосной станции. Избыточная мощность направляется на электролизёр, что вызывает рост степени заряда водородного накопителя. В вечерние часы, когда солнечная генерация снижается, а нагрузка остаётся значимой, в работу вступает топливный элемент, обеспечивая дополнительную мощность на шине постоянного тока и тем самым разгружая сельскую электрическую сеть.

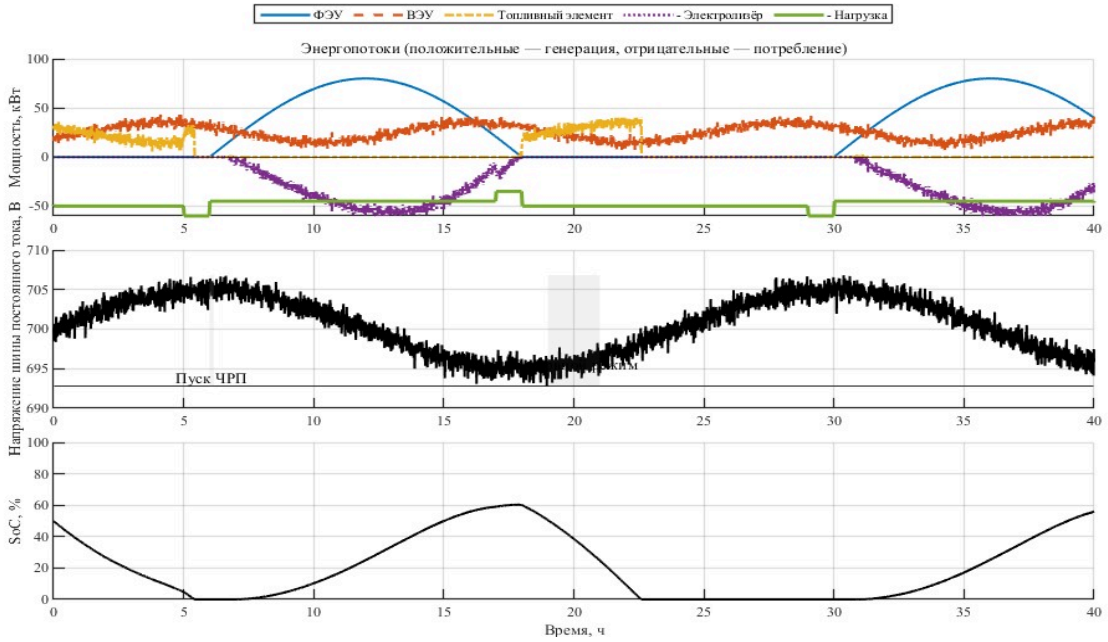


Рисунок 1 - Энергопотоки и напряжение шины постоянного тока в суточном сценарии работы гибридного комплекса ФЭУ–ВЭУ–водородный накопитель при энергоснабжении насосной станции орошения: мощности ФЭУ и ВЭУ, электролизёра и топливного элемента, потребляемая нагрузкой мощность; напряжение шины постоянного тока с указанием интервалов пуска ЧРП и островного режима; степень заряженности водородного накопителя.

Напряжение шины постоянного тока $U_{\mathrm{dc}}(t)$ (среднее поле рис. 1) в течение суток удерживается в заданном диапазоне, несмотря на изменения генерации ВИЭ и пуски частотно-регулируемого привода. Кратковременные отклонения напряжения при пусках насоса компенсируются за счёт регулирования со стороны инверторов и участия водородной подсистемы. В интервалах островного режима нагрузка питается исключительно за счёт ВИЭ и накопителя, обмен мощностью с сетью отсутствует, что снижает нагрузку на линии электропередачи и способствует улучшению показателей качества электроэнергии.

Степень заряда водородного накопителя $\mathrm{SoC}_{\mathrm{H_2}}(t)$ (нижнее поле рис. 1) в течение суток изменяется в пределах допустимого диапазона. В утренние и дневные часы накопитель заряжается за счёт избыточной выработки ФЭУ и ВЭУ, в вечерние часы и в начале ночного периода происходит разряд за счёт работы топливного элемента. Отсутствие режима насыщения или глубокого разряда накопителя свидетельствует о корректном выборе объёма резервуара водорода для рассматриваемого суточного графика нагрузки насосной станции.

Для количественной оценки влияния водородной подсистемы выполнено

сопоставление с базовым вариантом, в котором электролизёр и топливный элемент отключены $P_{\text{el}}(t) = P_{\text{fc}}(t) = 0$, а дефицит мощности полностью покрывается за счёт сельской электрической сети. По результатам интегрирования суточных графиков мощностей суточная энергия, потреблённая насосной станцией, составляет

$$E_{\text{load}} = 1140{,}6 \text{ кВт.ч}$$

В базовом варианте без водородного накопителя суточная энергия, потреблённая из сети, равна

$$E^{+}_{\text{grid},0} = 318{,}4 \text{ кВт.ч}$$

что соответствует доле покрытия суточной нагрузки за счёт ВИЭ

$$\alpha_0 = 72{,}1\ \%$$

В варианте с водородной подсистемой потребление энергии из сети уменьшается до

$$E^{+}_{\text{grid},H_2} = 70{,}3 \text{ кВт.ч}$$

а доля покрытия нагрузки за счёт возобновляемых источников и накопителя возрастает до

$$\alpha_{H_2} = 93{,}8\ \%$$

Таким образом, относительное снижение суточного потребления электроэнергии из сети составляет

$$\Delta E_{\text{grid}} = \frac{E^{+}_{\text{grid},0} - E^{+}_{\text{grid},H_2}}{E^{+}_{\text{grid},0}} \cdot 100\% = 77{,}9\ \%,$$

а увеличение доли покрытия нагрузки за счёт ВИЭ и накопителя

$$\Delta\alpha = \alpha_{H_2} - \alpha_0 = 21{,}8 \text{ процентного пункта.}$$

Полученные значения подчёркивают роль водородного накопителя как энергоёмкого буфера, согласующего суточную неравномерность генерации ВИЭ и электрической нагрузки насосной станции.

Качественная картина распределения энергопотоков и полученное увеличение вклада ВИЭ согласуются с результатами экспериментальных и расчётных исследований гибридных систем для орошения [7], где показано, что при рациональном подборе мощностей первичных источников и параметров накопителя возможно обеспечить требуемый водоподъём за счёт совместной работы фотоэлектрических и ветроэнергетических установок. Отмеченный эффект снижения сетевого потребления и повышения показателя α находится в одном тренде с результатами моделирования off-grid комплексов типа «ФЭУ–ветер–электролизёр» [8], а также с исследованиями, демонстрирующими, что комбинированное использование солнечной и ветровой генерации для производства водорода повышает устойчивость распределённых энергосистем [9].

С точки зрения технико-экономической оценки для рассматриваемого сценария можно ввести укрупнённый показатель условной стоимости электроэнергии на подачу 1 м³ оросительной воды. При принятом удельном расходе электроэнергии 0.1 кВт.ч/м^{3}и тарифе на сетевую электроэнергию 0,10 у.е./кВт.ч

условная стоимость энергии в базовом варианте без водородного накопителя составляет

$$C_{\text{эн},0} \approx 0{,}028 \text{ у.е./м}^3$$

В варианте с водородной подсистемой, при учёте приведённых годовых затрат на электролизёр, топливный элемент и резервуар водорода (аннуитет по капитальным вложениям и эксплуатационные расходы) и сниженного сетевого потребления до

E^{+}_{grid,H_2} условная стоимость энергии возрастает до

$$C_{\text{эн},H_2} \approx 0{,}054 \text{ у.е./м}^3$$

то есть примерно в 1,9 раза по сравнению с базовым вариантом. Это означает, что при принятых исходных стоимостных параметрах применение водородного накопителя пока не обеспечивает минимизацию прямых энергозатрат, но позволяет радикально сократить потребление электроэнергии из сети и повысить автономность системы. С учётом тенденций снижения капитальных затрат на водородное оборудование и возможного роста тарифов на сетевую электроэнергию можно ожидать, что экономическая привлекательность подобных решений для объектов орошения будет возрастать.

Выводы. В работе выполнен суточный энергетический анализ гибридного комплекса ФЭУ–ВЭУ–водородный накопитель–сеть, предназначенного для энергоснабжения насосной станции орошения. На основе математической модели получены суточные графики энергопотоков, напряжения шины постоянного тока и степени заряда водородного накопителя, а также рассчитаны интегральные показатели использования ВИЭ.

Основные выводы:

1. В дневные часы избыточная выработка ФЭУ и ВЭУ может быть эффективно использована для зарядки водородного накопителя при одновременном обеспечении требуемых режимов напряжения шины постоянного тока.

2. В вечерние и ночные часы работы насосной станции топливный элемент обеспечивает дополнительную мощность, разгружая сельскую электрическую сеть и снижая суточное потребление электроэнергии из неё на 77,9% (с 318,4 до 70,3 кВт·ч).

3. Применение водородного накопителя позволяет увеличить долю покрытия нагрузки за счёт ВИЭ до 93,8% против 72,1% в базовом варианте, что подтверждает целесообразность их использования в системах энергоснабжения объектов орошения с неравномерным графиком работы.

4. Суточный анализ энергобаланса позволяет связать энергетические показатели гибридного комплекса с режимами подачи оросительной воды и может служить основой для технико-экономической оценки, включая расчёт стоимости энергии на подачу 1 м³ воды.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение анализа до сезонных режимов работы насосной станции, оптимизацию параметров водородной подсистемы с учётом конкретных климатических и технологических условий региона, а также интеграцию разработанной модели в цифровые системы управления энергообеспечением объектов АПК.

Список использованных источников:

1. Кувшинов В.В., Юферев Л.Ю., Аль-Малики М.Н.К. Солнечные энергетические системы для частных потребителей // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71. № 3(56). С. 111–120.

2. Костик Н.Р., Сипатдинов А.М., Бобыль А.В., Эрк А.Ф. Оценка потенциала Российской Федерации и Узбекистана для внедрения солнечных систем возобновляемой энергетики // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 3(44). С. 86–103.

3. Марченко О.В., Соломин С.В. Конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63. № 4. С. 301–311.

4. Мирончук В.И., Вельченко А.А. Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счёт локализации солнечной энергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64. № 1. С. 15–26.

5. Шерьязов С.К. Методология рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей: дис. … д-ра техн. наук. Красноярск, 2011.

6. Трунов С.С., Хименко А.В., Тихомиров Д.А., Кузьмичев А.В. Установка электроснабжения удалённых объектов с солнечным термоэлектрическим генератором // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70. № 3(52). С. 48–55.

7. Kose F., Aksoy M.H., Ozgoren M. Experimental investigation of solar/wind hybrid system for irrigation in Konya, Turkey // Thermal Science. 2019. Vol. 23. No. 6B. P. 4129–4139. DOI: 10.2298/TSCI180515293K.

8. Ibáñez-Rioja A., Järvinen L., Puranen P., et al. Off-grid solar PV–wind power–battery–water electrolyzer plant: Simultaneous optimization of component capacities and system control // Applied Energy. 2023. Vol. 345. Art. 121277. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121277.

9. Tang O., Rehme J., Cerin P. Levelized cost of hydrogen for refueling stations with solar PV and wind in Sweden: On-grid or off-grid? // Energy. 2022. Vol. 241. Art. 122906. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122906.

Мерием Слиманоu Slimanou.meriem@gmail.com ,
Калинин Вячеслав Федорович, kalinin@tstu.ru
Тамбовский государственный технический университет, г.Тамбов, Россия

DAILY ENERGY PERFORMANCE ANALYSIS OF A HYBRID SYSTEM WITH HYDROGEN STORAGE FOR THE POWER SUPPLY OF AN IRRIGATION PUMPING STATION

Meriem Slimanou, Kalinin V. F.

Annotation. A hybrid energy system intended for the power supply of an irrigation pumping station is considered. The system combines a photovoltaic (PV) plant, a wind turbine, a hydrogen energy storage subsystem (electrolyzer, fuel cell and hydrogen tank) and a connection to a rural electric grid. A mathematical model is used to perform a daily energy analysis under a given daily operating schedule of the pumping station. Time profiles of the PV and wind power, the electrolyzer and fuel cell power, the load power, the DC bus voltage and the state of charge of the hydrogen storage are obtained. The redistribution of energy flows during the day and the grid load reduction during peak hours are demonstrated. A comparison with a baseline case without hydrogen storage is carried out in terms of daily grid electricity consumption and the share of the load supplied by renewable sources. It is shown that the hydrogen storage subsystem increases the share of renewables in the energy balance of the pumping station and reduces grid electricity consumption, which is promising for irrigation systems in remote rural areas.

Key words: irrigation, pumping station, hybrid energy system, photovoltaic plant, wind turbine, hydrogen energy storage, daily energy balance.

Meriem Slimanou , Slimanou.meriem@gmail.com
Kalinin Vyacheslav Fedorovich, kalinin@tstu.ru
Tambov State Technical University, Tambov, Russia

УДК 621.311.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ И МЕСТА ПОДКЛЮЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

А.В. Богдан[1], А.В. Богдан (мл)[1], К.А. Гарькавый[2]

ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ[1], ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева[2]

Аннотация. *Создание интегрированных систем энергоснабжения, использующих различные по природе и энергетическому потенциалу источники энергии, требует разработки новых методов их применения и оптимизации. В настоящей работе реализовано исследование систем распределенной генерации на напряжение 0,4 кВ, чтобы найти точку оптимального подключения дополнительного источника на примере протяженной линии с различными законами распределения нагрузки между потребителями, присоединенными к этой системе. Была определена оптимальная мощность по сокращению потерь электроэнергии в питающей линии дополнительного источника питания в виде фотоэлектрической батареи для линии с равномерно распределенной нагрузкой. Установлено, что величина глобального минимума математической модели системе распределенной генерации с подключенной фотоэлектрической батареей относительно активной мощности подключенной фотоэлектрической батареей батареи и относительно длины линии до места ее подключения находится 2/3. Оптимальное по потерям электроэнергии в линии питания место подключения находится на расстоянии 0,6 – 0,7 длины линии от питающего центра и максимальная мощность равна средней мощности потребления линии без батареи.*

Ключевые слова. *система распределенной генерации, фотоэлектрическая батарея, потери электрической энергии, активная мощность.*

Введение. Активное развитие энергосистем ставит новые задачи, такие как подключение генерирующих установок на основе возобновляемых источников к распределительным сетям. Фотоэлектрические батареи являются наиболее перспективными для создания и развития систем распределенной генерации. Данная система в отличии от ветроэнергетических установок, позволяет эффективно и с наименьшими затратами генерировать электроэнергию. В системах распределенной генерации возможно реализация сценария по извлечению максимально доступной мощности из возобновляемого источника энергии и подачи ее подключенной нагрузке, а избыток активной мощность перенаправить в распределительную сеть [1-3].

Одной из задач создания системы распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии, заключается в повышении качества электроэнергии, снижение колебания напряжения, потери мощности [4, 5].

Подключение фотоэлектрических систем осуществляется к шинам распредустройства низкого напряжения трансформаторной подстанции или к вводно-распределительному устройству, что неизбежно приведет к через мерной концентрации или дроблению на более малые мощности. Электроэнергию от фотоэлектрических систем передают в распределительные электрические сети в основном на основе одно- и двухступенчатой конфигурации источника стабилизированного питания. Одноступенчатая конфигурация

имеет меньшее количество преобразователей, но более сложную архитектуру управления по обеспечению работоспособности по сравнению с двухступенчатой конфигурацией [6, 7].

Подключение дополнительного источника питания внутри схемы электроснабжения при её одностороннем питании будет снижать технические потери при передаче электроэнергии в этой сети, так как обычно основная часть технических потерь сосредоточена в головной части схемы, а при введении дополнительного источника она разгружается за счет уменьшения тока от основного источника питания.

Цель работы заключается в том, чтобы найти точку оптимального подключения дополнительного источника на примере протяженной линии с различными законами распределения нагрузки между потребителями, присоединенными к этой линии.

Материалы и методы исследования

Таким образом, по условию задачи точка подключения дополнительного источника питания (фотоэлектрической батареи) находится не на шинах трансформаторной подстанции, а рядом с некоторой нагрузкой P_i. Наряду с уменьшение технических потерь в линии, к которй подключается дополнительный источник происходит выравнивание напряжений у всех подключенных потребителей.

Примем в качестве допущения, что нагрузка потребителей, подключенных к линии распределена равномерно и имеет одинаковые суточные графики нагрузки. Расчетная схема для анализа приведена на рисунке 1. Солнечная батарея, как источник питания, представляет источник тока, который подключается на расстоянии $l_{лин,а}$. Решим задачу определения оптимальной величины $l_{лин,а} = l_{лин,опт}$, если целевой функцией будет являться

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 R_{л,i} \rightarrow min, \quad (1)$$

где n - количество участков линии между потребителями, I_i, R_i . - ток и активное сопротивление участков питающей линии.

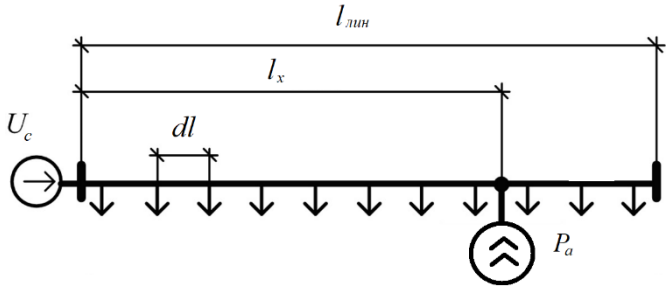


Рисунок 1 – Расчетная схема линии с равномерным распределением активной мощности потребителей

Поставленную задачу решим аналитически, для чего введем систему относительных единиц для мощности дополнительного источника и места его подключения, приняв за базу $P_{лин}$ – общую активную нагрузку линии.

$P_* = P_a / P_{лин})$ – относительная мощность дополнительного источника активной мощности;

$L_* = l_x / l_{лин}$ – относительная длина линии до места подключения дополнительного источника

Так как активные и реактивные токи линии взаимно ортогональны, то определение потерь от уменьшения активного тока не влияет на потери от реактивного тока. Общие технические потери будут уменьшаться в зависимости от коэффициента реактивной мощности $tg(\varphi)$, который считаем постоянным для всех потребителей

$$\Delta P_{\text{общ}} = \frac{\Delta P}{\sqrt{1+tg(\varphi)^2}}. \quad (2)$$

Поэтому дальнейший расчет будем проводить только для активных нагрузок и токов.

По условию необходимо подключить дополнительный источник P_a на расстоянии l_x. Эффективность применения P_a оцениваем количеством уменьшения потерь мощности в линии.

Для аналитического расчета перейдем от суммирования по участкам в (1) к интегрированию. Тогда потери в линии от активного тока, созданного нагрузкой и дополнительным источником активной мощности

$$\Delta P = \frac{R_{yd}}{U_c^2}\left(\int_0^{lx}\left[P_{yd}(l_{lin}-l)-Pa\right]^2 dl + \int_{lx}^{l_{\text{лин}}}\left[P_{yd}\cdot(l_{lin}-l)\right]^2 dl\right), \quad (3)$$

где P_{yd} – плотность активной нагрузки; R_{yd} – удельное активное сопротивление линии.

После интегрирования получим для ΔP

$$\Delta P = [3P_*L_*(P_*+L_*-2)+1]\,\Delta P_0, \quad (4)$$

где $\Delta P_0 = \frac{{P_{yd}}^2 {L_{lin}}^3 R_{yd}}{3U_{grid}^2}$ - расчетные потери в линии от активной мощности нагрузки при отсутствии дополнительного источника.

Определим величину глобального минимума функции (1).

Первые частные производные по P_* и L_*

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_*} = 3L_*\big(L_*+2(P_*-1)\big)\,\Delta P_0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial L_*} = 3P_*\big(P_*+2(L_*-1)\big)\,\Delta P_0. \quad (6)$$

Решая совместно (3) и (5) получаем векторы корней этой системы уравнений для относительной подключаемой мощности дополнительного источника P_* и относительного удаления точки подключения L_*.

$$P_* = \left|2\ 0\ 0\ \frac{2}{3}\right|,$$

$$L_* = \left|0\ 0\ 2\ \frac{2}{3}\right|.$$

Её вторые частные производные по P_* и L_* имеют вид

$$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial P_*^2} = 6L_*\,\Delta P_0\ ,$$

$$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial L_*^2} = 6P_*\,\Delta P_0\ ,$$

а смешанные производные $\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial L_* \partial P_*} = \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial P_* \partial L_*} = 6(P_*+L_*-1)\Delta P_0$.

Определитель матрицы Гессе положителен для системы уравнений (3) и (5)

$$\left\|\begin{matrix}\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial P_*^2} & \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial P_* \partial L_*} \\ \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial L_* \partial P_*} & \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial L_*^2}\end{matrix}\right\| = 12\,\Delta P_0\ > 0$$

только при последней паре корней, что соответствует минимуму функции.

Следовательно целевая функция (1) имеет глобальный минимум в точке с координатами

$$P_* = \frac{2}{3}\,,\ L_* = \frac{2}{3}. \quad (7)$$

Если оптимальные величины (7) подставить в (1), то определим минимально возможную величину потерь мощности в линии с распределенной активной нагрузкой при

подключении дополнительного источника

$$\Delta P_{min} = \frac{\Delta P_0}{9}, \quad (8)$$

Откуда можно сделать вывод, что подключение дополнительного источника к линии может уменьшить потери на передачу электрической энергии в 9 раз.

Разделив (1) на (8) получаем уравнение, позволяющее найти относительное увеличение потерь мощности в линии, если место подключения и величина мощности дополнительного источника отличаются от экономически целесообразных значений

$$\Delta P_* = 27 P_* L_* (P_* + L_* - 2) + 9. \quad (9)$$

Если дополнительного источника нет, то $P_* = 0$, $L_* = 0$ и $\Delta P_* = 9$. При оптимальной мощности источника, установленного в оптимальном месте $P_* = 2/3$, $L_* = 2/3$ и $\Delta P_* = 1$. Графическое отражение (9) показано на рисунке 2.

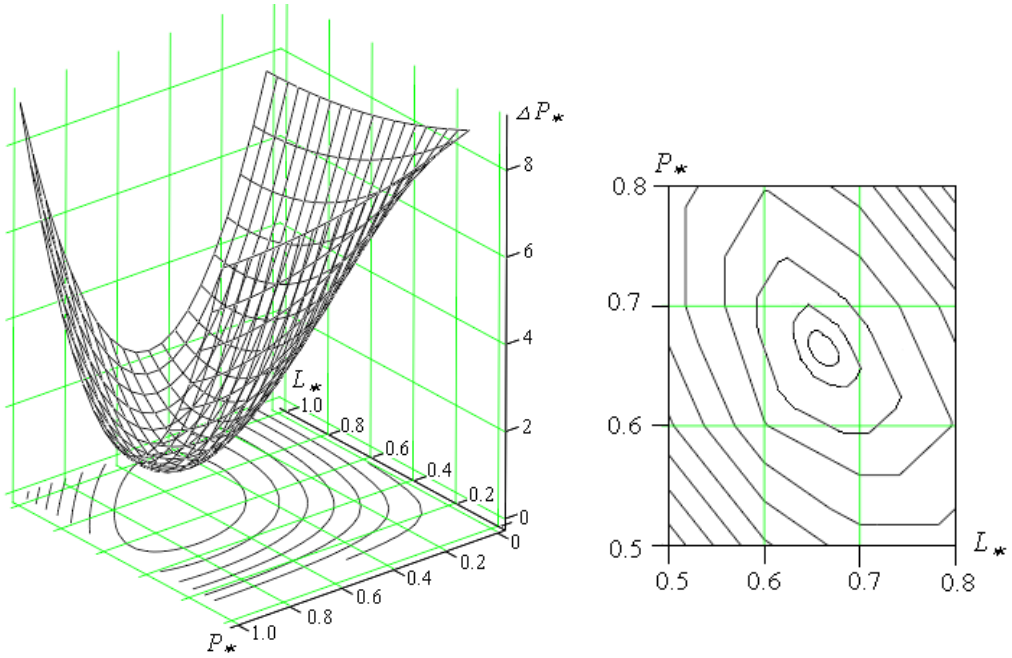


Рисунок 2 – Профили зависимости ΔP_* от относительных значений мощности дополнительного источника и места установки.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведем анализ для отдельного изменения L_* и P_* .

Экстремум функции (1) для изменения L_* определим из равенства нулю производной по L_*

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial L_*} = 3P_*\big(P_* + 2(L_* - 1)\big)\,\Delta P_0 = 0 \quad (10)$$

Из (6) получим зависимость относительного удаления точки подключения дополнительного источника от относительной мощности этого источника

$$L_{*e} = 1 - \frac{P_*}{2} \quad (11)$$

Вторая производная (1) в точке экстремума положительна,

$$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial L_*^2} = 6P_*\,\Delta P_0$$

что соответствует минимуму функции.

Следовательно (11) определяет место оптимального подключения применяемого дополнительного источника в зависимости от его мощности по минимуму потерь.

Аналогично, если подставить (11) в (1), то найдем зависимость потерь мощности в линии при подключении дополнительного источника в экономически целесообразную точку

$$\Delta P_{pe} = \left\{3P_* \left[P_* \left(1 - \frac{P_*}{4}\right) - 1\right] + 1\right\} \Delta P_0 \,. \qquad (11)$$

Целесообразную по потерям величину P_{*e} подключаемую в любую точку L_* линии определим из равенства нулю производной

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_*} = 3L_* \left(L_* + 2(P_* - 1)\right) \Delta P_0 = 0. \qquad (12)$$

Из (11) получаем

$$P_{*e} = 1 - \frac{L_*}{2} \,. \qquad (13)$$

что показывает зависимость мощности дополнительного источника от его места подключения. Если подставить (6) в (1), то найдем зависимость потерь мощности в линии при подключении дополнительного источника в оптимальную точку линии

$$\Delta P_{Le} = \left\{3L_* \left[L_* \left(1 - \frac{L_*}{4}\right) - 1\right] + 1\right\} \Delta P_0. \qquad (14)$$

По выражениям (12) и (14) можно найти экономически целесообразную мощность или экономически целесообразное место подключения если место подключения или мощность дополнительного источника заранее определены. Графики изменения ΔP_{pe} и ΔP_{Le} приведены на рисунке 3.



a) b)

Рисунок 3 – Относительное изменения потерь в линии при изменениях мощности дополнительного источника (a) или места его подключения (b)

Выводы.

Оптимальное по потерям электроэнергии в линии питания место подключения дополнительного источника (солнечной батареи) находится на расстоянии 0,6 – 0,7 длины линии от питающего центра. Максимальная мощность оптимальной по потерям солнечной батареи к примерно равна средней мощности потребления линии без батареи. Установка оптимальной солнечной батареи позволяет проще выполнять требования ГОСТ по допустимому отклонению напряжения у потребителей.

Список использованных источников

1. Abdul Basit B., Nguyen A.T., Ryu S.W., Park H. and Jung J.W. A state-of-the-art comprehensive review of modern control techniques for grid-connected wind turbines and photovoltaic arrays distributed generation systems // IET Renewable Power Generation. 2022. 16(11), pp. 2191-2222. DOI:10.1049/rpg2.12511

2. Amerkhanov R.A., Grigorash O.V., Garkaviy K.A., Bogdan A.V. and Tropin V.V. Concerning the concept of constructing combined ups systems // Journal of Industrial Pollution Control, vol. 33(1), pp. 797-803, 2017. ID: 31022392

3. Bogdan A.V., Bogdan V.A. and Garkavyi K.A. Optimization of power and place of

connection of photovoltaic system for power supply of poultry farm // International Ural Conference on Green Energy (UralCon), IEEE, pp. 57-62, 2018. DOI:10.1109/URALCON.2018.8544351

4. Логачева Е.А., Жданов В.Г., Молчанов А.Г., Омаров А.Б. Алгоритм решения задач оптимизации управления деятельностью энергетических служб // Сельский механизатор. 2018. № 5. С. 24-25. ID: 35421576

5. Клундук Г.А. Снижение потерь электроэнергии в сельских распределительных сетях // Сельский механизатор. 2017. № 4. С. 28-29. ID: 29010700

6. Xie M., Gulzar M., Tehreem H., Javed M.Y. and Rizvi S.T.H. Automatic voltage regulation of grid connected photovoltaic system using Lyapunov based sliding mode controller: A finite—Time approach //Autom. Syst., vol. 18, no. 6, pp. 1550–1560. DOI:10.1007/s12555-019-0563-x

7. Gulzar M.M. Iqbal A., Sibtain D., Khalid M. An innovative converterless solar PV control strategy for a grid connected hybrid PV/wind/fuel-cell system coupled with battery energy storage //IEEE Access. 2023. 11, pp. 23245-23259. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3252891

Bibliography:

1. Abdul Basit B., Nguyen A.T., Ryu S.W., Park H. and Jung J.W. A state-of-the-art comprehensive review of modern control techniques for grid-connected wind turbines and photovoltaic arrays distributed generation systems // IET Renewable Power Generation. 2022. 16(11), pp. 2191-2222. DOI:10.1049/rpg2.12511

2. Amerkhanov R.A., Grigorash O.V., Garkaviy K.A., Bogdan A.V. and Tropin V.V. Concerning the concept of constructing combined ups systems // Journal of Industrial Pollution Control, 2017, vol. 33(1), pp. 797-803. ID: 31022392

3. Bogdan A.V., Bogdan V.A. and Garkavyi K.A. Optimization of power and place of connection of photovoltaic system for power supply of poultry farm // International Ural Conference on Green Energy (UralCon), IEEE, 2018, pp. 57-62. DOI 10.1109/URALCON.2018.8544351/

4. Logacheva E.A., Zhdanov V.G., Molchanov A.G., Omarov A.B. Algorithm for solving problems of optimizing the management of energy services // Rural Machine Operator. 2018. No. 5, pp. 24-25. ID: 35421576

5. Klunduk G.A. Reducing electricity losses in rural distribution networks // Rural Machine Operator. 2017. No. 4. pp. 28-29. ID: 29010700

6. Xie M., Gulzar M., Tehreem H., Javed M.Y. and Rizvi S.T.H. Automatic voltage regulation of grid connected photovoltaic system using Lyapunov based sliding mode controller: A finite—Time approach //Autom. Syst., 2019. Vol. 18, no. 6, pp. 1550–1560. DOI:10.1007/s12555-019-0563-x

7. Gulzar M.M. Iqbal A., Sibtain D., Khalid M. An innovative converterless solar PV control strategy for a grid connected hybrid PV/wind/fuel-cell system coupled with battery energy storage //IEEE Access. 2023. Vol. 11, pp. 23245-23259. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3252891

Александр Владимирович Богдан, д.т.н., профессор кафедры кафедра электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, alina48av@mail.ru
Александр Владимирович Богдан (мл), магистр
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, alina48av@mail.ru

Константин Алексеевич Гарькавый, к.т.н., доцент кафедра электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, k.garkaviy@rgau-msha.ru

DETERMINING PHOTOVOLTAIC ARRAY POWER AND CONNECTION POINTS IN A DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM

A.V. Bogdan, A.V. Bogdan (Jr.),
Kuban State Agrarian University
K.A. Garkavyi
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev

Annotation. The creation of integrated power supply systems using energy sources of varying nature and energy potential requires the development of new methods for their application and optimization. This paper examines 0.4 kV distributed generation systems to determine the optimal connection point for an additional source using the example of an extended transmission line with varying load distribution laws among consumers connected to this system. The optimal power for reducing power losses in the feeder line of an additional power source in the form of a photovoltaic array was determined for a line with a uniformly distributed load. It was found that the global minimum of the mathematical model for a distributed generation system with a connected photovoltaic array relative to the active power of the connected photovoltaic array and the line length to its connection point is 2/3. The optimal connection point for power line losses is located at a distance of 0.6–0.7 times the line length from the feeder center, and the maximum power is equal to the average power consumption of the line without the array.

Keywords: distributed generation system, photovoltaic array, electrical energy losses, active power.

Alexander Vladimirovich Bogdan, Doctor of Engineering, Professor, Department of Electrical Engineering, Thermal Engineering, and Renewable Energy Sources, Kuban State Agrarian University, alina48av@mail.ru
Alexander Vladimirovich Bogdan (Jr.), Master's Degree, Kuban State Agrarian University, alina48av@mail.ru
Konstantin Alekseevich Garkavy, Ph.D., Associate Professor, I.A. Budzko Department of Electric Power Supply and Thermal Energy, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, k.garkaviy@rgau-msha.ru

УДК 621.31

ОЗОНИРОВАННАЯ ВОДА В СОВРЕМЕННОМ ПТИЦЕВОДСТВЕ

В. Л. Болотин, А. В. Пискарёва

РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева

Аннотация. *В статье рассматривается актуальная проблема водопотребления и водоочистки в современном российском птицеводстве, масштабы которого существенно выросли. На основе анализа литературы, выделяются три ключевых направления использования воды в этой отрасли: поение птицы, технологические процессы переработки мяса и транспортировка отходов. Подчеркивается, что водозабор часто осуществляется из открытых источников, что затрудняет достижение соответствия воды строгим питьевым нормам, необходимым на всех производственных этапах. В качестве эффективного решения проблем обеззараживания и очистки воды предлагается технология озонирования. В статье доказываются преимущества этой технологии. Отмечается высокая эффективность процесса озонирования, а также его безопасность, качество, многофункциональность, технологическая целесообразность, экологичность. На основании анализа нормативной базы и научных исследований в статье делается вывод, что внедрение озонирования способно комплексно улучшить эпизоотическую ситуацию, качество готовой продукции, надежность оборудования и эффективность использования водных ресурсов на птицеводческих предприятиях.*

Ключевые слова: *озонатор**,** озон, окислитель, озонированная вода, птицеводство.*

Введение. Масштабы птицеводства в настоящее время в России возросли. По данным государственной статистики, опубликованной на сайте Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС), производство птицы в живом весе в сельскохозяйственных организациях в период с 2015 по 2024 год увеличилось с 5 524,2 тысяч тонн до 6 678,23 тысяч тонн [7].

Все этапы производства в птицеводстве сопровождает процесс значительного водопотребления. Согласно санитарным нормам, для мясоперерабатывающих предприятий на всех стадиях технологического цикла применяется вода, соответствующая стандартам питьевой [8, с. 82]. На многих птицеводческих предприятиях водозабор осуществляется из открытых водоемов, из-за этого достигнуть уровня качества воды, соответствующего питьевой, достаточно сложно. Именно поэтому задачи, связанные с очисткой воды для птицеводческих фабрик, являются очень актуальными.

Цель работы заключается в анализе литературы, позволяющей определить целесообразность применения озонаторов воды в современном птицеводстве.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования послужили такие источники информации, как официальная статистика, опубликованная на сайте Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) о динамике производства птицы в России (2015-2024 гг.); научная и техническая литература: монографии и справочники, научные статьи в специализированных изданиях, зарубежные исследования; нормативно-техническая документация: саннормы для мясоперерабатывающих предприятий; специализированные

отраслевые источники: данные по нормам водопотребления в птицеводстве, информация от производителей оборудования (озонаторов); технологические регламенты: описания стандартных технологических процессов переработки птицы.

Основными методами, применяемыми в данном исследовании, являются аналитический обзор литературы, который заключается в систематическом поиске, отборе, изучении и обобщении информации из перечисленных выше источников и сравнительный анализ: сравнивается эффективность озонирования с другими методами дезинфекции, потенциальные эффекты озонирования на разных этапах производства (поение, технологическая вода, сточные воды).

Результаты исследования и их обсуждение

На основе проанализированных источников, можно выделить два основных направления применения воды в птицеводстве: это вода для поения птицы и вода, сопровождающая технологические процессы производства мяса птицы, кроме этих направлений вода применяется в транспортировке отходов птицеводства. Озонирование воды может быть эффективно для каждого из этих направлений. Свойства озона, способствующие обеззараживанию воды, описаны многими исследователями [1]. Озон убивает все виды бактерий, вирусов, грибов и простейших, но не оказывает разрушающего и раздражающего действия на ткани многоклеточного организма. В Техническом справочнике по обработке воды отмечается, что область применения озона шире, чем у других дезинфектантов [1, с. 362].

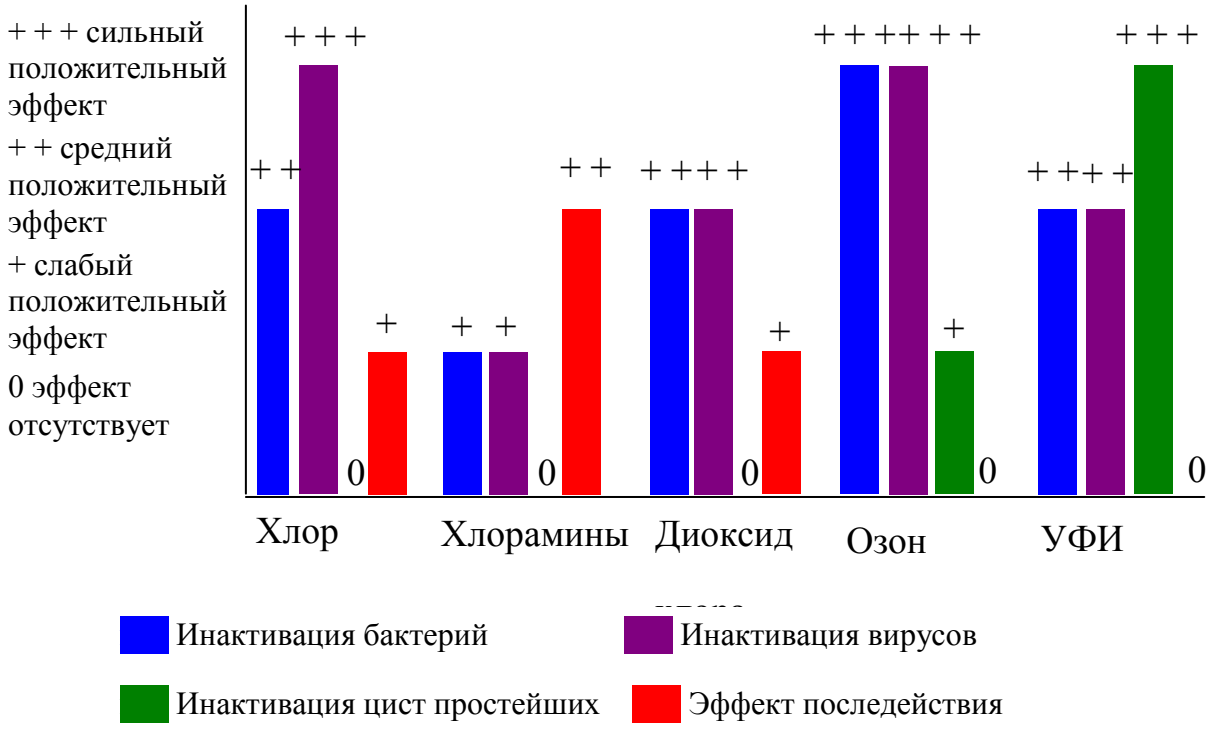


Рисунок 1 – Потенциальные области применения основных дезинфектантов.

Озонирование рекомендовано во многих нормативных документах, например: Дезинфекция и дезодорация в холодильниках способом озонирования (Министерство торговли СССР, 1973г.); Методические рекомендации по применению озона в качестве дезинфицирующего средства (Минпищепром СССР, 1976г.); Временная инструкция по

озонированию камер хранения твёрдых сычужных сыров (Министерство торговли РСФСР, 1975г.); Инструкция по приёмке, хранению, товарной обработке и выпуску колбасных изделий и копчёностей на распределительных холодильниках торговли (Министерство торговли РСФСР, 1977г.); Инструкция по приёмке, холодильной обработке, хранению и выпуску остывшего и охлаждённого мяса (Министерство торговли РСФСР, 1977 г.) [6, с. 18].

Химические реакции с озоном могут быть двух типов, которые зависят от того, реагирует ли озон непосредственно в своей молекулярной форме или разлагается с образованием гидроксильного радикала OH, являющегося более сильным окислителем, чем озон [1, с. 352].

Таблица 1 – Реакции озона с неорганическим соединениями

Осаждение железа	$2Fe^{2+} + O_3 + 5H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + O_2 + 4H^+$
Осаждение марганца	$Mn^{2+} + O_3 + H_2O \rightarrow MnO_2 + O_2 + 2H^+$
Окисление сульфидов	$S^{2-} + 4O_3 \rightarrow SO_4^{2-} + 4O_2$
Окисление нитритов	$NO_2^- + O_3 \rightarrow NO_3^- + O_2$
Окисление цианидов	$CN^- + O_3 \rightarrow CNO^- + O_2$
Окисление аммиака	$NH_3 + 4O_3 \rightarrow NO_3^- + 4O_2 + H_3O^+$
Окисление галогенидов	$Br^- + O_3 \rightarrow BrO^- + O_2$

По данным специальной литературы, для поения птицы необходимо 0,36 литров воды в сутки на одну голову [3, с. 55]. Водозабор для нужд птицеводства часто происходит из открытых источников, поэтому возможно наличие бактериального загрязнения, однако даже вода хорошего качества может поменять свои показатели из-за биопленки на стенках бака и системах поения [5, с. 41]. Наличие биопленки делает методы очистки воды дезинфицирующими средствами малоэффективными. Озонирование решает проблему бактериального загрязнения, а также другие проблемы качества воды – мутность и запах [1, с.352].

Значение качества воды для поения птицы отражено в статье «Что нужно знать о качестве воды для птицы?», в которой отмечается, что вода должна соответствовать строгим нормам по микробиологическим (отсутствие патогенных бактерий, таких как E. coli, Сальмонелла) и физико-химическим (нитраты, нитриты, жесткость, общее солесодержание) показателям [5]. Грязная вода может стать причиной вспышек заболеваний. Качество воды напрямую влияет на микробиологическую обсемененность кишечника птиц. Патогены из кишечника (например, Campylobacter) могут в процессе переработки загрязнять туши и оборудование, попадая в воду охладительных систем и создавая риск перекрестного заражения всей партии продукции.

На предприятиях, перерабатывающих мясо птицы, вода – это главный технологический ресурс, от которого зависит качество, безопасность и выход готовой продукции. Переработка мяса птицы является более водоемким процессом, чем переработка мяса сельскохозяйственных животных [8, с. 82].

Технологический процесс производства мяса птицы содержит несколько стадий. Первая – это оглушение в электромонтажной ванне [10]. Туши птицы погружаются в воду, через которую пропускается электрический ток, что считают гуманным оглушением перед убоем. Качество воды и ее электропроводность критически важны для эффективности процесса. Процесс озонирования и сопутствующие ему химические реакции косвенно могут

изменить электропроводность.

Вторая стадия – ошпарка. После убоя тушки погружаются в горячую воду для облегчения последующего удаления пера [9]. Температура и время выдержки строго контролируются в зависимости от типа птицы и категории продукта. Для повышения температуры воды, как правило, применяют тэны. Низкое качество воды повлечет за собой образование накипи, и, как следствие, выход из строя нагревательных элементов. Некоторые производители озонаторов утверждают, что предварительное озонирование воды позволит в этом случае избежать порчи электрооборудования [4].

Следующий этап переработки мяса птицы – это охлаждение в чиллерах. Водяное охлаждение бывает двух видов: погружное охлаждение и душ-охлаждение, при котором тушки охлаждаются под струями ледяной воды. Назначение такого охлаждения – быстрое снижение температуры туши до +4°С, что обеспечивает подавление роста микробов и безопасность продукции [9]. Эффективность применения озонирования на этом технологическом этапе отмечалась учеными с 1986 года [10]. Количество патогенных и вызывающих порчу микроорганизмов на тушках птицы, охлажденных в озонированной воде, снижается. На основании зарубежных исследований [11], можно говорить, что озонирование не меняет цвета обрабатываемого мяса, что также является преимуществом.

Предварительное озонирование воды, поступающей в чиллеры, также имеет свои преимущества по сравнению с обеззараживанием воды хлором. Если вода содержит хлор, то это может поменять вкусовые качества продуктов из охлажденного в такой воде мяса, так как при водяном охлаждении тушки могут впитывать часть воды.

По завершении каждой технологической операции, образующиеся сточные воды, имеющие различный компонентный состав и концентрации загрязняющих веществ, отводятся в систему канализации.

Задача очистки сточных вод является очень актуальной как для защиты окружающей среды от загрязнения, так и для сохранения водных ресурсов, так как допускается повторное использование воды, получаемой после обеззараживания и очистки сточных вод [2, с.377]. Очищение должно проходить несколько этапов, так как требуется достичь уровня показателей, соответствующих питьевой воде. Озонирование является частью этого процесса.

Выводы

Таким образом, применение озонирования воды в птицеводстве может решить множество вопросов, связанных со здоровьем поголовья птиц, качеством получаемой продукции, а также надежностью работы оборудования и регулированием водопотребления птицеводческих фабрик благодаря очистке и повторному использованию сточных вод.

Список использованных источников:

1. Герасимов, Г. Н. Технический справочник по обработке воды Т.1 / Г. Н. Герасимов, М. И. Алексеев, В.Г. Иванов, А.М, Курганов, Г.П. Медведев, Б.Г. Мишуков, Ю.А. Феофанов, Л.И. Цветкова, Н.А. Черников. – СПб.: Новый журнал, 2007. – 878 с.

2. ИТС 43-2017 Убой животных на мясокомбинатах, мясохладобойнях, побочные продукты животноводства. – Москва: Бюро НДТ. – 2017. – 481 с.

3. Кузнецов, А. Ф. Современные технологии и гигиена содержания птицы / А. Ф. Кузнецов, Г. С. Никитин: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 352 с.

4. Озонирование питьевой воды в птицеводстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ozonbox.pro/ozonirovaniye-pityevoy-vody. – Заглавие с экрана. – (Дата

обращения: 19.10.2025).

5. Околелова, Т. М. Что нужно знать о качестве воды для птицы? / Т.М. Околелова, С.В. Енгашев, А.Н. Струк, Е.А. Струк // Птицеводство. – 2021. – №11. С. 41–45.

6. Пожидаев, Д. В. Параметры и режимы работы электроозонатора для работы в условиях повышенной влажности при дезинфекции биореакторов: дис. канд. технич. наук: 05.20.02. – Москва: 2021. – 129 с.

7. Производство скота и птицы на убой в живом весе в хозяйствах всех категорий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fedstat.ru/indicator/31367. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 19.10.2025).

8. Секирина, А. П. Анализ возможности внедрения систем оборотного водоснабжения на мясоперерабатывающих предприятиях / А. П. Секирина, В. М. Мисюченко // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2024. – №1. С.82–92.

9. Технологические процессы производства мяса птицы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sprut-technology.ru/node/85. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 19.10.2025).

10. Chang, Y. H. Application of ozone with physical wastewater treatments to recondition poultry process waters / Y. H. Chang, B. W. Sheldon // Poultry Science. – 1989. –№8. С. 1078–1087.

11. Elhafeez, M.S. The effectiveness of aqueous ozone on the levels of biogenic amines and their causative bacteria in chicken cuts using a verified HPLC assay / **M**aha S. Abd Elhafeez, Fatma H. Amro, Mona Momtaz M. Abd el-aziz, Eman El Khawaga, Eman Shukry, Gamilat A. Elsaid, Mahmoud A. Abdelrahman, Heba E. Farhan, Waleed A. Ibrahim and Pierre E. Mehanny // European journal of pharmaceutical and medical research. –2024. –№11(12). С. 62–70.

Bibliography:

1. Gerasimov, G. N. Technical Handbook on Water Treatment, Vol. 1 / G. N. Gerasimov, M. I. Alekseev, V. G. Ivanov, A. M. Kurganov, G. P. Medvedev, B. G. Mishukov, Yu. A. Feofanov, L. I. Tsvetkova, and N. A. Chernikov. St. Petersburg: Novy Zhurnal, 2007. 878p.

2. ITS 43-2017 Slaughter of animals at meat processing plants, meat cold storage plants, and by-products of animal husbandry. – Moscow: NDT Bureau. – 2017. – 481 p.

3. Kuznetsov, A. F. Modern Technologies and Hygiene of Poultry Keeping / A. F. Kuznetsov, G. S. Nikitin: Textbook. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2012. – 352 p.

4. Ozonation of drinking water in poultry farming. – URL: https://ozonbox.pro/ozonirovaniye-pityevoy-vody. – Title from the screen. – (Accessed: 19.10.2025).

5. Okolelova, T. M. What should you know about the quality of water for poultry? / T.M. Okolelova, S.V. Engashev, A.N. Struk, E.A. Struk // Poultry Farming. – 2021. – No. 11. – Pp. 41–45.

6. Pozhidaev, D. V. Parameters and operating modes of an electro-ozonator for operation in conditions of increased humidity during the disinfection of bioreactors: dis. cand. techn. sciences : 05.20.02. – Moscow: 2021. – 129 p.

7. Production of livestock and poultry for slaughter in live weight in farms of all categories. – URL: https://fedstat.ru/indicator/31367. – Title from the screen. – (Accessed: 19.10.2025).

8. Sekirina, A. P. Analysis of the possibility of introducing recirculating water supply systems at meat processing enterprises / A. P. Sekirina, V. M. Misyuchenko // Journal of the Belarusian State University. Ecology. – 2024. – No. 1. Pp. 82–92.

9. Technological processes of poultry meat production. – URL: https://sprut-technology.

10. Chang, Y. H. Application of ozone with physical wastewater treatments to recondition poultry process waters / Y. H. Chang, B. W. Sheldon // Poultry Science. – 1989. –№8. С. 1078–1087.

11. Elhafeez, M.S. The effectiveness of aqueous ozone on the levels of biogenic amines and their causative bacteria in chicken cuts using a verified HPLC assay / Maha S. Abd Elhafeez, Fatma H. Amro, Mona Momtaz M. Abd el-aziz, Eman El Khawaga, Eman Shukry, Gamilat A. Elsaid, Mahmoud A. Abdelrahman, Heba E. Farhan, Waleed A. Ibrahim and Pierre E. Mehanny // European journal of pharmaceutical and medical research. –2024. –№11(12). С. 62–70.

Владимир Леонидович Болотин, инженер, соискатель ученой степени РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева,

Анастасия Владимировна Пискарёва, аспирант кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко, РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева

OZONIZED WATER IN MODERN POULTRY FARMING

V. L. Bolotin, A. V. Piskaryova

Annotation. The article discusses the current problem of water consumption and water treatment in modern Russian poultry farming, the scale of which has grown significantly. Based on the analysis of the literature, three key areas of water use in this industry are identified: poultry watering, technological processes of meat processing and waste transportation. It is emphasized that water intake is often carried out from open sources, which makes it difficult to achieve water compliance with strict drinking standards required at all production stages. Ozonation technology is proposed as an effective solution to the problems of disinfection and purification of water. The article proves the advantages of this technology. The high efficiency of the ozonation process is noted, as well as its safety, quality, versatility, technological feasibility, and environmental friendliness. Based on the analysis of the regulatory framework and scientific research, the article concludes that the introduction of ozonation can comprehensively improve the epizootic situation, the quality of finished products, the reliability of equipment and the efficiency of the use of water resources in poultry farms.

Keywords: ozonizer, ozone, oxidizer, ozonized water, poultry farming.

Vladimir Leonidovich Bolotin, Engineer, Applicant for a Scientific Degree, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Anastasia Vladimirovna Piskaryova, Postgraduate Student of the Department of Power Supply and Thermal Power Engineering named after Academician I.A. Budzko, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev

УДК 658.5.012.7

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И КЛАССИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Владыкин И. Р.[1], Владыкин Д. И.[2]

[1]Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск, Удмуртская республика, Российская Федерация
[2]Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Удмуртская республика, Российская Федерация

Аннотация. *В статье представлен сравнительный анализ двух принципиально различных методологий автоматизированного оптического контроля в контексте производственных процессов электроники, а именно классического алгоритмического подхода на основе библиотеки OpenCV и подхода на основе машинного обучения с использованием платформы Edge Impulse. Исследование сфокусировано на задаче инспекции монтажа радиоэлектронных компонентов на печатных платах. Цель работы – провести объективную оценку эффективности каждого из методов по ключевым для промышленного внедрения критериям, таких как: точность детектирования, скорость проверки, а также трудоемкость разработки, настройки и требованиям к исходным данным. На основе проведенного анализа формируются практические рекомендации по выбору оптимального подхода в зависимости от конкретных условий производственного процесса и поставленных задач.*

Ключевые слова: *Машинное зрение, автоматизация, оптический контроль, алгоритм, печатная плата.*

Введение. Автоматизация является ключевым драйвером повышения эффективности, точности и экономической целесообразности технологических процессов. Ее универсальный характер подтверждается применением в разнородных отраслях – от машиностроения и АПК до легкой промышленности, к примеру использование робота-манипулятора для выполнения погрузочно-разгрузочных работ [1], применение автоматизированного комплекса для регулирования содержания CO2 [4] или программно-информационная система для автоматизированного построения базовых выкроек одежды [2]. Это свидетельствует о том, что почти любую повторяющуюся операцию можно описать точными правилами и поручить задачу машинам.

Автоматизация контроля печатных плат – важная задача. Для ее решения существуют два подхода: классический (алгоритмический) и на основе машинного обучения [7]. Классические методы, основанные на сравнении с эталоном, хорошо изучены [6, 5], а нейросетевые подходы активно развиваются [7]. Однако их прямое практическое сравнение недостаточно освещено. Цель нашей работы – провести такое сравнение на примере детекции дефектов. В электронной промышленности, где требования к качеству и надежности продукции крайне высоки, особая значимость отводится контролю монтажа и целостности печатных плат. В подавляющем большинстве эта задача возлагается на операторов, которые проводят визуальную инспекцию. Однако данный метод обладает

существенными ограничениями: человеческое восприятие подвержено утомлению, что ведет к снижению концентрации и пропуску дефектов при длительной и монотонной работе, а субъективность оценки может приводить к разной интерпретации одного и того же недостатка. Внедрение системы автоматического визуального контроля призвано расширить возможности операторов, такая автоматизация позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, обеспечить стабильность, повысить пропускную способность производственной линии и гарантировать объективность контроля. Согласно исследованиям, в области производственной безопасности, от 70% до 80 % всех несчастных случаев на производстве происходят по причине человеческого фактора [3], именно поэтому автоматизация важных и рутинных операций становится необходимым условием для обеспечения стабильного качества, безопасности и эффективности современного производства.

Материалы и методы исследования. В рамках данного исследования были разработаны и подвергнуты сравнительному анализу два принципиально различных метода автоматизации оптического контроля монтажа радиоэлектронных компонентов на печатных платах с целью оценки их практической применимости.

На первом этапе был создан экспериментальный стенд для оптического контроля на основе машинного обучения. Конструкция стенда представляет собой комплекс следующих модулей: Шаговые двигатели и подвижный стол для сканируемой платы (номера 1 и 3 на рисунке 1), модуль ESP32-CAM (номер 2 на рисунке 1), драйвера для управления шаговыми двигателями на микросхеме A4988 и понижающий DC-DC преобразователь (номера 4 и 5 на рисунке 1).

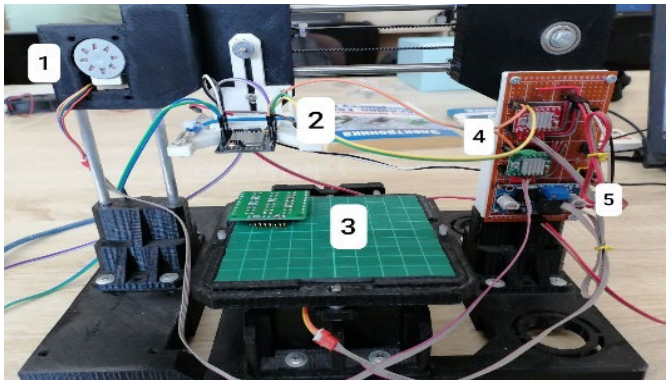


Рисунок 1 – Макет с обученной моделью

Для получения каких-либо данных при сканировании печатной платы была разработана программа для взаимодействия с персональным компьютером. Возможности программы: подключение ПК к макету (область 1 на рисунке 2), ручное управление макетом и ввод данных печатной платы (области 2 и 3 на рисунке 2), вывод информации в виде массивов (область 4 на рисунке 2).

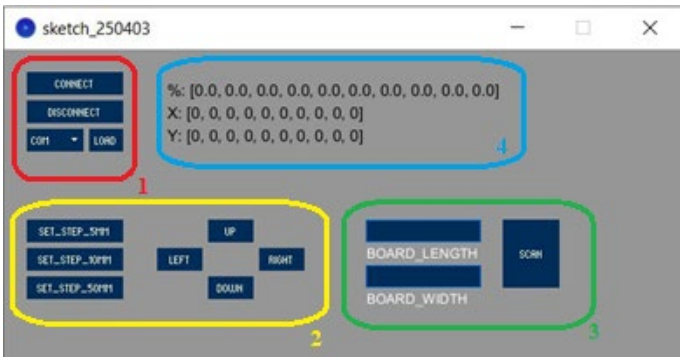


Рисунок 2 – Программа для взаимодействия ПК с макетом

В результате тестирования макета с моделью, обученной на платформе Edge Impulse, были получены следующие результаты, точность обнаружения дефектов составила 85% (модель идентифицирует 6 из 7 предъявленных дефектов).

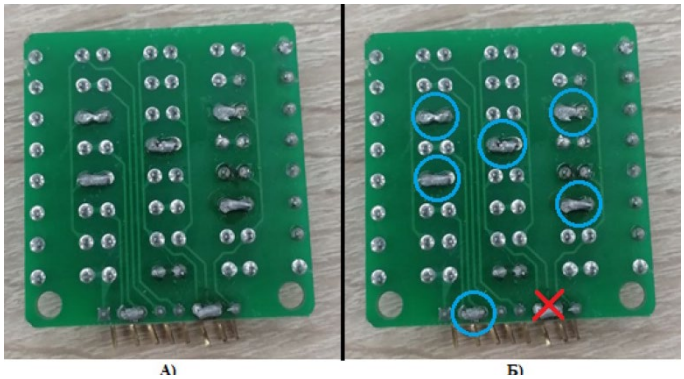


Рисунок 3 – Опытный образец (А); Найденные дефекты (Б)

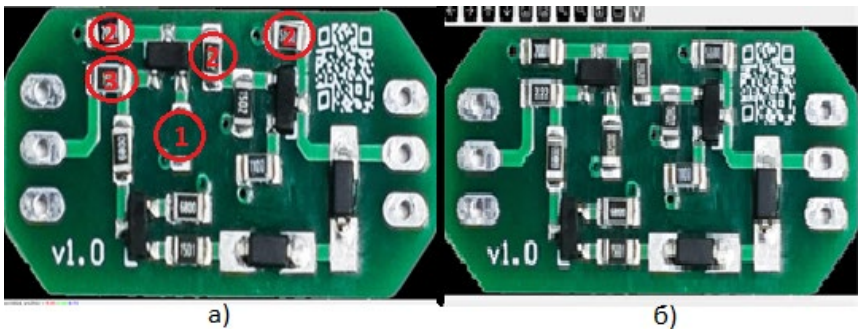
Переходя к рассмотрению ограничений и недостатков, следует отметить, что данный метод относительно долгий, время сканирования маленькой платы (25 на 25 мм) составляет 30 секунд, но это с учетом времени на передвижения камеры макета и отделения ошибочных данных. Само фактическое сканирование происходит практически мгновенно.

Существенным технологическим ограничением подхода является его узкая специализация: модель детектирует исключительно дефект «перемычка». Расширение ее функционала (выявления других типов дефектов) потребует значительных дополнительных трудозатрат и времени на сбор нового набора данных и повторное обучение.

В качестве альтернативного подхода был разработан алгоритм машинного зрения на языке Python с помощью библиотеки OpenCV. Данный метод основан исключительно на классических способах обработки изображений и не предполагает применения моделей машинного обучения. В основе алгоритма лежит метод сравнения по абсолютной разности двух изображений (идеальной платы без дефектов и тестируемой с возможными отклонениями). Его работа реализуется следующим циклом обработки:

1. Загрузка и предобработка. Исходные изображения эталонной и тестируемой платы загружаются, конвертируются в единый формат и преобразуются в черно-белый формат.
2. Сегментация и анализ. Оба изображения разбиваются на идентичные матрицы ячеек. Для каждой пары соответствующих ячеек выполняется попиксельное сравнение яркости (значения в диапазоне 0-255, где 0 – черный, 255 – белый).
3. Принятие решений. Для каждой ячейки вычисляется среднее значение абсолютной разности пикселей. Если этот показатель превышает заданный порог, ячейка классифицируется как содержащая дефект.

Для проверки алгоритма использовались тестовые изображения, включая искусственно смоделированные дефекты, созданные с помощью графических редакторов.



а) б)

Рисунок 4 – Изображение с обозначенными дефектами (а); Изображение идеальной платы

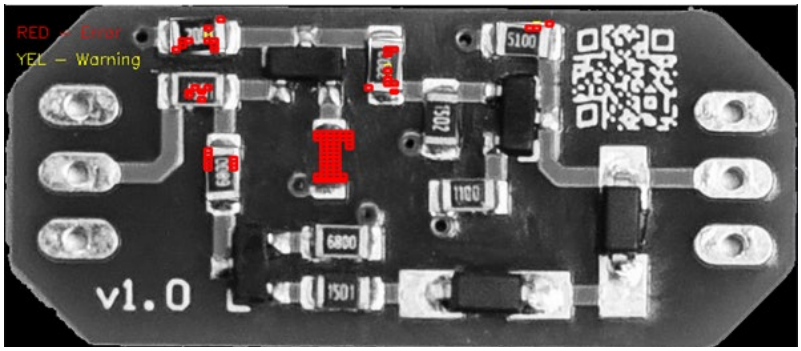


Рисунок 5 – Результат работы алгоритма

Рисунок 5 демонстрирует высокую чувствительность алгоритма, детектировавшего все внесенные дефекты. Однако в условиях реального производства такая чувствительность становится недостатком, так как технологические допуске при монтаже приводят к естественным вариациям в позиционировании компонентов, что делает полную идентичность плат невозможной. Как следствие алгоритм интерпретирует эти допустимые отклонения как дефекты, генерируя ложные срабатывания. Данный метод имеет очень сложную и долгую настройку, так как для каждой платы нужно подбирать собственный порог допустимого отклонения.

Данный метод сканирует изображение платы целиком из-за чего процесс сканирования не превышает 5-10 секунд (в зависимости от размера изображения), с учетом времени на отбор ложных данных, а фактическое сканирование также происходит почти мгновенно.

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о принципиальном различии между двумя подходами к автоматизации оптического контроля.

Классический алгоритмический подход на основе OpenCV, при всей его относительной простоте в разработке, демонстрирует критичные для промышленного применения недостатки. Он требует трудоемкой ручной настройки параметров допустимого порога под каждый новый тип изделия и оказывается чрезмерно чувствительным к естественным производственным вариациям, что ведет к большому числу ложных срабатываний. Применение данного метода к визуальному контролю монтажа радиоэлектронных компонентов считаем не целесообразным, однако возможно применение к контролю топологии печатных плат.

Модель машинного обучения, разработанная с использованием Edge Impulse, представляет собой полную противоположность. Ее создание сопряжено с высокими начальными трудностями и затратами, обусловленными необходимостью сбора и разметки обширного набора данных, а также повторным обучением модели. Однако ключевым преимуществом данного подхода являестя его универсальность и адаптивность, обученная модель способна выявлять довольно сложные дефекты без необходимости указания жёстких правил и тонкой ручной настройки. Применение данного метода считаем целесообразным.

Список использованных источников

1. Бабоченко Н. В. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ / Н.В. Ббоченко, В.А. Краснов, С.А. Зубрилина // Агротехника и энергообеспечение

– 2025. № 3 (48). – С. 74 – 80.

2. Бакаева О.А. Разработка программно-информационной системы для автоматизированного построения базовых выкроек женской одежды / Бакаева О.А. Шургина Е.Д. // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2024. – № 4. – С. 37–44.

3. Богуш М. И. ОБЗОР СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА / М.И. Богуш, Л.В. Гордиенко, И.А. Дмитриева, Е.С. Скачкова // Фундаментальные исследования – 2017. № 1. – С. 15 – 20.

4. Владыкин И. Р. Автоматизированный комплекс регулирования содержания CO2 в сооружениях защищенного грунта / И.Р. Владыкин, М.А. Иванов // Актуальные проблемы энергетики АПК в современной реальности – 2024. : сб. материалов Международной научно-практической конференции, посвященной основателю факультета энергетики и электрификации Валентину Васильевичу Фокину (Ижевск 15 мая 2024 г.). – С. 95 – 100.

5. Изосимова Т. А. Разработка автоматизированной системы управления диагностикой печатных плат на основе машинного зрения / Т.А. Изосимова, М.В. Максимова, О.В. Михайлова // Вестник НГИЭИ – 2018. №1 (80). – С. 7 – 18.

6. Ким Н. В. Обработка и анализ изображений высокодинамичных объектов в масштабе реального времени / Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, П.Д. Прохоров // Вестник МАИ – 2015. №1. – С. 38 – 46.

7. Ходатаева Т. С. Подходы к разработке системы обнаружения дефектов печатных плат на основе технологии АОИ / Т.С. Ходатаева, Н.В. Каширин, А.И. Аверина, А.Е. Гурьянов // Труды ИСП РАН – 2023. №4. – С. 109 – 120.

Bibliography

1. Babochenko N. V. JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A ROBOT-MANIPULATOR FOR LOADING AND UNLOADING OPERATIONS / N. V. Bvbochenko, V. A. Krasnov, S. A. Zubrilina // Agrotechnics and energy supply – 2025. № 3 (48). – pp. 74 – 80.

2. Bakaeva O.A. Development of a software and information system for the automated construction of basic patterns of women's clothing / Bakaeva O.A. Shurgina E.D. // Bulletin of the Izhevsk State Technical University. – 2024. – № 4. – pp. 37–44.

3. Bogush M. I. REVIEW OF THE STRUCTURE OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR ASSESSING PROFESSIONAL RISKS TAKING INTO ACCOUNT THE HUMAN FACTOR / M. I. Bogush, L. V. Gordienko, I. A. Dmitrieva, E. S. Skachkova // Fundamental Researc – 2017. № 1. – pp. 15 – 20.

4. Vladykin I. R. Automated complex for regulating CO2 content in protected ground structures / I. R. Vladykin, M. A. Ivanov // Actual problems of energy in the agro-industrial complex in modern reality – 2024. : collection of materials International scientific and practical conference dedicated to the founder of the Faculty of Power Engineering and Electrification Valentin Vasilyevich Fokin (Izhevsk, May 15, 2024). – pp. 95 – 100.

5. Izosimova T. A. Development of an automated control system for diagnostics of printed circuit boards based on machine vision / T. A. Izosimova, M. V. Maksimova, O. V. Mikhailova // Bulletin of NGIEI – 2018. №1 (80). – pp. 7 – 18.

6. Kim N. V. Processing and analysis of images of highly dynamic objects in real time / N. V. Kim, N. E. Bodunkov, P. D. Prokhorov // Bulletin of MAI – 2015. №1. – pp. 38 – 46.

7. Khodataeva T. S. Approaches to the development of a system for detecting defects in

printed circuit boards based on AOI technology / T. S. Khodataeva, N. V. Kashirin, A. I. Averina, A. E. Guryanov // Proceedings of the ISP RAS – 2023. №4. – pp. 109 – 120.

Владыкин Иван Ревович, доктор технических наук, профессор. Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск, Удмуртская республика, Российская Федерация

Владыкин Дмитрий Иванович, студент-бакалавр. Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Удмуртская республика, Российская Федерация

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF COMPUTER VISION METHODS BASED ON MACHINE LEARNING AND CLASSICAL IMAGE PROCESSING FOR AUTOMATIC CONTROL TASKS и

Vladykin I. R.[1], Vladykin D. I.[2]

[1]Udmurt State Agrarian University, Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation

[2]Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov, Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation

Abstract. This article presents a comparative analysis of two fundamentally different automated optical inspection methodologies in the context of electronics manufacturing processes: a classical algorithmic approach based on the OpenCV library and a machine learning-based approach using the Edge Impulse platform. The research focuses on the task of inspecting the installation of electronic components on printed circuit boards. The purpose of the work is to conduct an objective assessment of the effectiveness of each of the methods according to key criteria for industrial implementation, such as: detection accuracy, verification speed, as well as the complexity of development, configuration, and requirements for source data. Based on the analysis, practical recommendations are formed for choosing the optimal approach, depending on the specific conditions of the production process and the tasks set.

Keywords: Machine vision, automation, optical control, algorithm, printed circuit board.

Vladykin Ivan Revovich[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Udmurt State Agrarian University, Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation.

Vladykin Dmitry Ivanovich[2], bachelor student. Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov, Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation

УДК 004.8:637.115

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ТРАВМАТИЗМА ВЫМЕНИ

А.А. Жидович

Белорусский государственный аграрный технический университет

Аннотация. *Статья посвящена проблеме обеспечения стабильности рабочего вакуума в доильных установках. Показано, что динамические колебания вакуума, вызванные непредсказуемым изменением технологической нагрузки, являются основной причиной травматизма вымени и неэффективности классических ПИД-регуляторов. Целью работы является разработка и обоснование прогностической системы управления частотой асинхронного электропривода на базе нейросетевого контроллера LSTM. В отличие от реактивных ПИД-регуляторов, разработанный метод использует LSTM-модуль для упреждающего прогнозирования динамики вакуума и формирования корректирующего управляющего сигнала. Моделирование проводилось в среде MATLAB/Simulink при критическом ступенчатом сбросе нагрузки. Численные результаты подтвердили высокую эффективность прогностического подхода: максимальное отклонение вакуума* ΔP_{max} *было снижено на 81,5% (с 6,5 кПа до 1,2 кПа), а среднеквадратическое отклонение (*σ_p*) уменьшено на 77,3%. Время регулирования сократилось почти в три раза. Реализация прогностического управления гарантирует поддержание вакуума в безопасном технологическом коридоре (50±2 кПа), исключая травматизм вымени, и демонстрирует снижение энергопотребления электропривода до 4,5% в динамических режимах работы.*

Ключевые слова: *вакуум, электропривод, частота, давление, время, ячейка, LTSM.*

Введение. Эффективность и экономические показатели молочного животноводства критически зависят от технологического совершенства процесса доения. Центральным звеном доильной установки является система поддержания вакуума, функционирующая за счет электропривода вакуумного насоса.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью обеспечения максимальной стабильности рабочего вакуума, поскольку его динамические колебания являются основным этиологическим фактором, провоцирующим травматизм вымени и возникновение мастита, что приводит к значительным экономическим потерям (снижение надоев, увеличение ветеринарных расходов) [3,8].

В настоящее время для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя вакуумного насоса широко применяются частотные преобразователи с классическими пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИД) регуляторами [2]. Однако, в условиях дискретного и непредсказуемого изменения нагрузки (резкое подключение или, что особенно опасно, снятие доильных аппаратов), ПИД-регуляторы демонстрируют существенный недостаток: они работают по принципу обратной связи, реагируя на отклонение вакуума по факту его возникновения. Это приводит к возникновению

недопустимых по амплитуде и длительности динамических флуктуаций вакуума (ΔP_{max}), представляющих опасность для здоровья животного.

Для перехода к высокоточному и безопасному доению требуется внедрение систем прогностического (упреждающего) управления.

Целью данной работы является разработка и теоретическое обоснование применения адаптивного нейросетевого контроллера на базе архитектуры Long Short-Term Memory (LSTM) для управления частотой асинхронного электропривода вакуумного насоса. Данный подход позволит осуществить прогностическую компенсацию технологических возмущений, обеспечив тем самым высокую стабильность вакуума в динамических режимах работы.

Научная новизна заключается в интеграции LSTM-сети в контур управления как инструмента для точного прогнозирования нагрузки и формирования упреждающего управляющего сигнала, что позволяет значительно снизить среднеквадратическое отклонение вакуума ($\sigma_{P_{max}}$) по сравнению с традиционными регуляторами.

Динамика электропривода, управляемого частотным преобразователем, описывается уравнениями, связывающими электромагнитный момент $M_{эм}$ с токами и потокосцеплениями, а также механическую динамику ротора:

Уравнение механической динамики:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_{эм} - M_{с} - D_{\omega} \quad (1)$$

где J – суммарный момент инерции ротора двигателя и насоса, кг·м^2;

ω – угловая скорость ротора, рад/с;

$M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

M_c – момент сопротивления, создаваемый вакуумным насосом (нагрузка), Н·м;

D – коэффициент вязкого трения.

Уравнение электромагнитного момента:

$$M_{эм} = 1{,}5P\left(\psi_d i_q - \psi_q i_d\right) \quad (2)$$

где P – число пар полюсов;

ψ_d, ψ_q, i_d, i_q – проекции потокосцеплений и токов статора/ротора в синхронно вращающейся системе координат d, q.

Частота питания f, задаваемая преобразователем, является управляющим воздействием, которое определяет скорость ω и, следовательно, производительность насоса.

Для наглядного представления элементов контура, влияющих на динамику вакуума, рассмотрим его графическую схему.

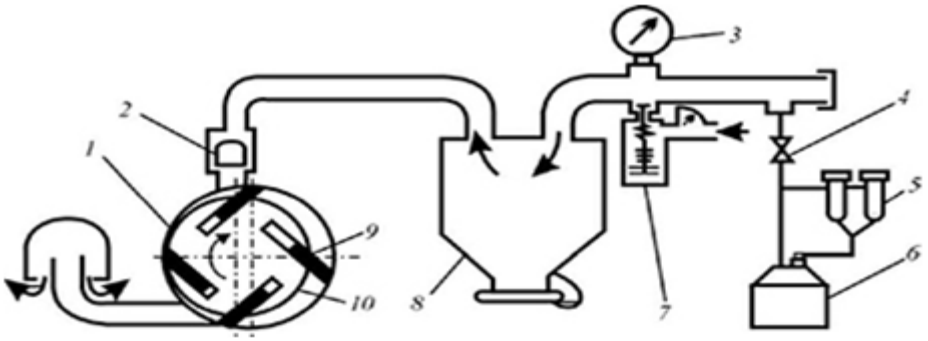


Рисунок 1 – Принципиальная схема вакуумной системы доильной установки [6].

На схеме представлены ключевые элементы, входящие в математическую модель:

1) Электропривод и вакуумный насос, определяющие производительность $Q_{н}(\omega)$;

2) Вакуумный ресивер и трубопроводы, формирующие эффективный объем системы $V_{сист}$;

3) Датчик вакуума (P), обеспечивающий обратную связь; 4) Доильные аппараты, являющиеся источником переменной технологической нагрузки $Q_{техн}\big(L(t)\big)$. Визуализация данной структуры необходима для понимания физических связей, описанных в уравнении баланса.

Динамика изменения вакуума (P) в пневматическом контуре доильной установки описывается уравнением баланса, учитывающим приток (производительность насоса) и отток (суммарный расход воздуха через утечки и аппараты):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{V_{сист} \cdot C}\big(Q_{н}(\omega) - Q_{пот}(P, L)\big) \quad (3)$$

P – вакуум (избыточное давление) в системе, кПа;

$V_{сист}$ – эффективный объем вакуумного ресивера и трубопроводов, м^3;

С – поправочный коэффициент, учитывающий термодинамические процессы;

$Q_{н}(\omega)$ – объемная производительность насоса, зависящая от угловой скорости ω, м^3/с;

$Q_{пот}(P, L)$ – суммарный расход воздуха через утечки и технологические нагрузки, м^3/с.

Ключевым фактором, вызывающим динамические колебания, является непредсказуемое изменение расхода воздуха $Q_{пот}$. Суммарный расход представляется как:

$$Q_{пот}(t) = Q_{баз} + Q_{техн}\big(L(t)\big) \quad (4)$$

где $Q_{баз}$ – постоянные утечки воздуха через уплотнения и технологические элементы, м^3/с;

$Q_{техн}\big(L(t)\big)$ – переменный технологический расход, зависящий от состояния нагрузки, м^3/с;

$L(t)$ – числа подключенных и снятых доильных аппаратов.

Функция нагрузки $L(t)$ является ступенчатой и дискретной (импульсной), что создает резкие, нелинейные возмущения в правой части дифференциального уравнения. Именно непредсказуемый характер $L(t)$ и ступенчатое изменение $Q_{техн}$ требуют применения прогностических алгоритмов управления, способных предугадать эти скачки и сгенерировать упреждающий управляющий сигнал $f(t)$.

Совместное решение уравнений электрической и технологической части составляет полную математическую модель объекта, на основе которой проводится имитационное моделирование, обучение и тестирование разработанного LSTM-контроллера.

Материалы и методы исследования

Для реализации прогностического управления, способного учитывать историю технологических процессов и компенсировать нелинейные возмущения $L(t)$, была выбрана архитектура Long Short-Term Memory (LSTM), являющаяся модификацией рекуррентных нейронных сетей (RNN). Выбор LSTM обусловлен ее эффективностью при работе с временными последовательностями [2].

В отличие от стандартных “скрытых состояний” НС, LSTM-ячейка содержит специальные вентили (forget, input, output gates) и ячейку памяти (cell state). Эта структура позволяет сети селективно "запоминать" долгосрочные зависимости в динамике нагрузки и "забывать" несущественные шумы [5].

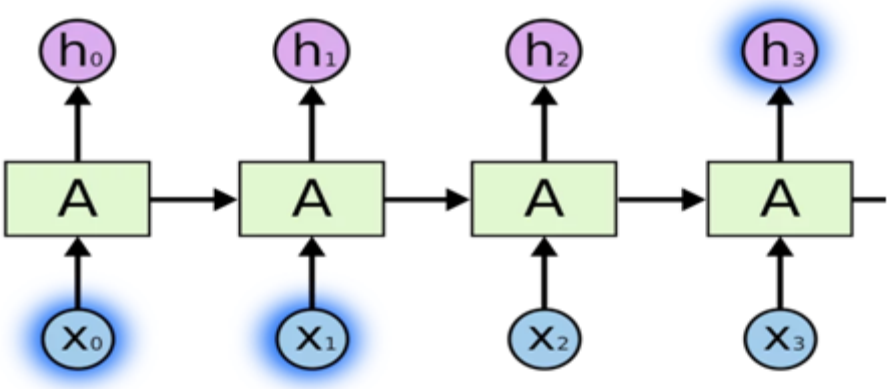


Рисунок 2 - Упрощенная архитектура ячейки Long Short-Term Memory (LSTM)

Схема иллюстрирует принцип работы LSTM-ячейки. Ключевые компоненты: Вектор Ячейки Памяти (A), служащий "долговременной памятью", и Управляющие Вентили (забывания, ввода, вывода X_n). Вентили обеспечивают селективную фильтрацию данных, позволяя сети сохранять информацию о долгосрочных трендах нагрузки и использовать ее для формирования “скрытого состояния” (h_n) – выхода ячейки, необходимого для прогнозирования.

Разработанный контроллер интегрируется в контур управления асинхронным электроприводом вакуумного насоса, как показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структурная схема интегрированного прогностического контура управления вакуумным насосом

Система образует замкнутый контур, в котором задание P^* последовательно проходит через блок прогнозирования, MPC-оптимизатор, адаптивный ПИ-регулятор и частотный преобразователь, воздействуя на исполнительный механизм – асинхронный двигатель вакуумного насоса. Обратная связь по давлению P, току I и частоте f, обогащённая данными от блока оценки состояния и модели процесса, обеспечивает адаптивное и опережающее управление.

Прогностический контроллер выполняет следующие функции:

Сбор данных: получает текущие и исторические значения вакуума (P_t), скорости двигателя (ω) и текущей управляющей частоты (f_t).

Прогноз: Обученная LSTM-сеть, используя накопленную информацию, прогнозирует значение вакуума $P_{t+\Delta t}$ через заданный интервал времени Δt (например, $\Delta t = 0{,}5$ с).

Оценка ошибки: вычисляется ожидаемое отклонение $\Delta P_{\text{ожид}} = P_{\text{зад}} - P_{t+\Delta t}$.

Упреждающая коррекция: на основе $\Delta P_{\text{ожид}}$ рассчитывается упреждающая поправка Δf к частоте преобразователя.

Формирование управляющего сигнала: на частотный преобразователь подается скорректированный управляющий сигнал $f_{\text{нов}} = f_{\text{текущ}} + \Delta t$. Это позволяет системе действовать на опережение, компенсируя возмущение до того, как оно приведет к критическому падению вакуума.

Эффективность прогностической системы управления полностью зависит от качества обучения LSTM-сети. Цель обучения — научить сеть предсказывать будущее состояние вакуума $P_{t+\Delta t}$ на основе анализа предшествующей динамики системы.

Обучающий набор данных был сформирован с использованием имитационной модели объекта управления (см. выше). Модель была запущена в условиях, максимально приближенных к реальным, включая случайную и ступенчатую функцию нагрузки $L(t)$ (имитация хаотичного подключения/отключения доильных аппаратов).

Входной вектор (X_t): на каждом шаге времени t сеть получает последовательность параметров, отражающих состояние системы за N предыдущих моментов (временной горизонт):

$$X_t = \{P_t, P_{t-1}, \dots, P_{t-N+1}; \omega_t, \omega_{t-1}, \dots, \omega_{t-N+1}\} \quad (5)$$

где N – длина памяти (например, $N = 10$ шагов).

Целевое значение (Y_t): фактическое значение вакуума, которое наступит через время прогноза Δt:

$$Y_t = \{P_{t+\Delta t}\} \quad (6)$$

Обучение сети осуществлялось методом обратного распространения ошибки (Backpropagation) с использованием оптимизатора Adam.

Функция потерь (Loss Function): для минимизации ошибки между прогнозируемым значением и фактическим будущим состоянием использовалась Среднеквадратическая ошибка (Mean Squared Error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}(P_{t+\Delta t}^{\text{факт},i} - P_{t+\Delta t}^{\text{прогноз},i})^2 \to min \quad (7)$$

где K – общее количество обучающих примеров;

$P_{t+\Delta t}^{\text{факт},i}$ – фактическое значение вакуума, полученное от модели;

$P_{t+\Delta t}^{\text{прогноз},i}$ — выходное значение LSTM-сети.

Эффективность прогнозирования напрямую зависит от топологии и параметров обученной нейронной сети. Архитектура LSTM-контроллера была выбрана эмпирически в процессе моделирования для достижения оптимального баланса между точностью прогноза и скоростью вычислений, необходимой для управления в реальном времени.

В разделе разработана структура прогностической системы управления частотой электропривода вакуумного насоса. Обоснован выбор архитектуры LSTM для анализа временных последовательностей и прогнозирования динамики вакуума $P_{t+\Delta t}$. Определена топология сети и принципы ее обучения на основе минимизации среднеквадратической ошибки (MSE).

Ключевым результатом раздела является переход от реактивного принципа управления

к прогностическому, где LSTM-модуль формирует упреждающее управляющее воздействие Δf, полностью устраняя проблему запаздывания, присущую классическим ПИД-регуляторам.

Результаты исследования и их обсуждение

Имитационное моделирование объекта управления, описываемого системой дифференциальных уравнений (1)–(4), проводилось в программном комплексе MATLAB/Simulink.

В среде Simulink была собрана полная динамическая модель, включающая: блок асинхронного двигателя, блок частотного преобразователя, блок вакуумного насоса и блок пневматического контура с переменной нагрузкой.

Разработка LSTM: Разработка, обучение и тестирование нейросетевого контроллера осуществлялись на языке программирования Python с использованием библиотеки TensorFlow/Keras. Интеграция LSTM-модуля с динамической моделью Simulink реализована посредством Co-Simulation (совместного моделирования).

Заданное значение: Целевое значение вакуума $P_{\text{зад}}$ было установлено на уровне 50 кПа.

Для объективного сравнения был выбран наиболее критический для доильной установки тестовый сценарий – ступенчатый сброс максимальной технологической нагрузки.

Сценарий: В установившемся режиме работы (вакуум 50 кПа) производится резкое отключение четырех доильных аппаратов (имитация снятия с вымени). Это приводит к резкому скачку расхода $Q_{\text{техн}}\big(L(t)\big)$ и, как следствие, к быстрому увеличению вакуума (положительное возмущение).

Сравнительный анализ: Моделирование проводилось для двух идентичных систем с одним и тем же возмущением, но с разными регуляторами:

1) Классический ПИД-регулятор;

2) Разработанный LSTM-контроллер.

Динамика изменения вакуума при ступенчатом сбросе нагрузки для двух систем представлена на Рисунке 4.

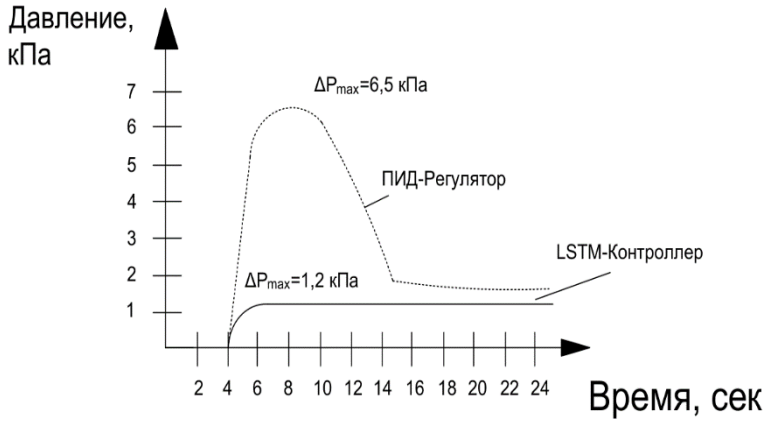


Рисунок 4. Динамика изменения вакуума при ступенчатом сбросе нагрузки: сравнение ПИД-регулирования и LSTM-контроллера.

График наглядно демонстрирует реакцию системы управления вакуумным насосом на

критическое ступенчатое возмущение.

ПИД-регулятор (Пунктирная линия): из-за принципа работы по факту отклонения, наблюдается значительное запаздывание реакции. Это приводит к критическому выбросу вакуума ($\Delta P_{max} \approx 6{,}5$ кПа), который является травматичным.

LSTM-контроллер (Сплошная линия): благодаря прогностическому модулю, контроллер упреждает развитие возмущения. Максимальное отклонение вакуума снижается до $\Delta P_{max} \approx 1{,}2$ кПа, что гарантирует высокую стабильность [4].

Для количественной оценки эффективности разработанного контроллера были рассчитаны ключевые показатели качества регулирования.

Таблица 1. Сравнительный анализ показателей качества регулирования вакуума.

Показатель	Единица измерения	Единица измерения	LSTM-контроллер	Улучшение, %
Максимальное отклонение вакуума (ΔP_{max})	кПа	6,5	1,2	81,5 %
Среднеквадратическое отклонение вакуума (σ_p)	кПа	1,85	1,2	77,3 %
Время регулирования ($t_{\text{рег}}$)	с	4,8	1,5	68,7 %
Относительное снижение энергопотребления	%	0	4,5	–

Численные результаты однозначно подтверждают высокую эффективность прогностического алгоритма. Наиболее критичным показателем является снижение максимального отклонения вакуума ΔP_{max} на 81,5 %. Снижение этого параметра до 1,2 кПа гарантирует исключение травматизма вымени, вызванного критическими динамическими колебаниями. Существенное снижение среднеквадратического отклонения σ_p на 77,3% свидетельствует о повышении общего качества доения. Кроме того, за счет более точного и плавного управления частотой, система с LSTM-контроллером демонстрирует снижение энергопотребления до 4,5% в динамических режимах работы.

Выводы

Проведенный анализ показал, что нестабильность вакуума в доильных установках, вызванная дискретным и непредсказуемым характером технологической нагрузки $L(t)$, является критическим фактором, снижающим эффективность производства и провоцирующим травматизм вымени. Установлено, что традиционные ПИД-регуляторы не способны компенсировать резкие возмущения из-за присущего им запаздывания.

Для устранения этого недостатка разработана структура прогностической системы управления частотой асинхронного электропривода на основе нейросетевого контроллера LSTM. В отличие от реактивного ПИД-регулятора, LSTM-модуль, обученный на динамической модели объекта, выполняет упреждающее прогнозирование вакуума $P_{t+\Delta t}$ и формирует скорректированный управляющий сигнал Δf до фактического проявления возмущения.

Имитационное моделирование, проведенное в среде MATLAB/Simulink с интеграцией LSTM-контроллера (TensorFlow/Keras), подтвердило высокую эффективность

разработанного метода. При критическом ступенчатом сбросе нагрузки:

- Максимальное отклонение вакуума ΔP_{max} снижено на 81,5% (с 6,5 кПа до 1,2 кПа).
- Среднеквадратическое отклонение σ_p снижено на 77,3%.
- Время регулирования сокращено почти в 3 раза.

Реализация прогностического управления обеспечивает стабильность рабочего вакуума в пределах безопасного технологического коридора (50±2 кПа), гарантируя исключение травматизма вымени. Кроме того, за счет более точного и плавного управления частотой, система демонстрирует снижение энергопотребления электропривода до 4,5% в динамических режимах работы.

Разработанный LSTM-контроллер может быть рекомендован к внедрению на современных молочно-товарных фермах для повышения качества доения, минимизации ветеринарных расходов и оптимизации энергопотребления.

Список использованных источников

1. Смирнов И.А., Петров В.С. Нейросетевое управление электроприводами: обзор и перспективы. // Электротехника. 2023. № 5. С. 45–52.
2. Баскаков В.А. Теория автоматического регулирования в АПК. М.: Колос, 2022. 310 с.
3. Интернет-ресурс International Dairy Federation (IDF). Guidelines on milking machine installation and performance. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.fil-idf.org/guidelines (дата обращения: 12.12.2025).
4. Коваленко А.В. Разработка адаптивной системы регулирования вакуума доильной установки: диссертация канд. техн. наук. Орел, 2024, 160 с.
5. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 775 p.
6. Схема доильной машины и расчет расхода. // Доильные аппараты. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doilnye-apparaty.ru/articles/shema-doilnoy-mashini-i-raschet-rashoda.html (дата обращения: 12.12.2025).
7. Поляков А.Б., Сидоров Г.И. Векторное управление асинхронными двигателями: принципы и реализация. // Вестник технических наук. 2021. № 3. С. 112–120.
8. Кузьмин П.В., Сафонов Е.А. Анализ влияния нестабильности вакуума на качество доения и продуктивность. // Агротехника и энергообеспечение. 2023. № 2. С. 34–40.

Bibliography

1. Smirnov I.A., Petrov V.S. Neural network control of electric drives: review and prospects. Electrotechnics. 2023. No. 5. P. 45–52.
2. Baskakov V.A. Theory of automatic control in agriculture. Moscow: Kolos, 2022. 310 p.
3. International Dairy Federation (IDF). Guidelines on milking machine installation and performance. [Electronic resource]. Available at: www.fil-idf.org/guidelines (accessed: 12.12.2025).
4. Kovalenko A.V. Development of an adaptive vacuum regulation system for a milking unit: PhD dissertation (Eng). Orel, 2024, 160 p.
5. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 775 p.
6. Milking machine diagram and flow calculation. Milking machines. [Electronic resource]. Available at: https://doilnye-apparaty.ru/articles/shema-doilnoy-mashini-i-raschet-rashoda.html (accessed: 12.12.2025).

7. Polyakov A.B., Sidorov G.I. Vector control of asynchronous motors: principles and implementation. Bulletin of Technical Sciences. 2021. No. 3. P. 112–120.

8. Kuzmin P.V., Safonov E.A. Analysis of the influence of vacuum instability on milking quality and productivity. Agroengineering and Energy Supply. 2023. No. 2. P. 34–40.

Александр Антонович Жидович, магистрант Белорусский государственный аграрный технический университет, dovator2005@yandex.ru

APPLICATION OF ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROL ALGORITHMS FOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE TO OPTIMIZE MILKING UMIT OPERATION MODES AND MINIMIZE UDDER TRAUMA.

A.A. Zhydovich

Belarusian State Agrarian Technical University

Annotation. The article addresses the problem of ensuring the stability of the working vacuum in milking units. It is shown that dynamic vacuum fluctuations, caused by unpredictable changes in technological load, are the main reason for udder trauma and the inefficiency of classic PID controllers. The aim of the work is to develop and substantiate a predictive control system for the frequency of an asynchronous electric drive based on an LSTM neural network controller. Unlike reactive PID controllers, the developed method uses the LSTM module for anticipatory forecasting of vacuum dynamics and forming a corrective control signal. Simulation was carried out in the MATLAB/Simulink environment under a critical step load drop. Numerical results confirmed the high efficiency of the predictive approach: the maximum vacuum deviation (ΔP_{max}) was reduced by 81.5% (from 6.5 kPa to 1.2 kPa), and the root-mean-square deviation (σ_p) was reduced by 77.3%. The settling time was reduced by almost three times. The implementation of predictive control guarantees the maintenance of vacuum within the safe technological corridor (50±2 kPa), eliminating udder trauma, and demonstrates a reduction in electric drive energy consumption by up to 4.5% in dynamic operating modes.

Keywords: vacuum, electric drive, frequency, pressure, time, cell, LSTM.

Alexander Antonovich Zhydovich, master's degree student, Belarusian State Agrarian Technical University dovator2005@yandex.ru

УДК 631.362

ПРЕДПОСЫЛКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРЕД НАЧАЛОМ УБОРОЧНЫХ РАБОТ

Шеварыкина Д.В., Полохин А.М.

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

Аннотация: *Оптимизация процесса направлена на разработку методологии оперативного контроля влажности зерновых культур с использованием ручных приборов очистки зерна от примесей. Данный подход позволяет повысить точность измерений, сократить временные издержки и обеспечить аграриям доступ к оперативной информации о состоянии урожая. Целью данного исследования является оптимизация процесса измерения влажности зерна в полевых условиях перед началом уборочных работ, что является критически важным для обеспечения качества урожая и повышения эффективности агрономических практик. Описаны предпосылки внедрения новых технологий, проведен сравнительный анализ существующих методов, направленных на повышение качества предварительной обработки проб зерна перед измерением влажности.*

Ключевые слова*: влажность зерна, уборка урожая, полевые условия, ручной прибор очистки, примеси зерна.*

Введение. Измерение влажности зерна является одной из ключевых задач в агрономии и сельском хозяйстве, особенно перед началом уборочных работ. Влажность зерна напрямую влияет на его качество, хранение и переработку, а также на общую эффективность сельскохозяйственного производства. В условиях полевых работ, где необходимо быстро и точно оценить влажность зерна, применение автоматических приборов становится особенно актуальным. Влажность зерна определяется как содержание воды в нем, выраженное в процентах от массы зерна. Этот показатель имеет критическое значение, поскольку зерно, обладающее высокой влажностью, подвержено быстрому порче, развитию грибков и микробов, что может привести к значительным экономическим потерям.

Актуальность данной темы обусловлена растущими требованиями к качеству сельскохозяйственной продукции и необходимости повышения эффективности аграрного производства. В условиях изменения климата и колебаний погодных условий, точное измерение влажности зерна становится критически важным для предотвращения потерь и обеспечения оптимальных условий хранения.

Основная часть. Современные методы измерения влажности зерна разнообразны и включают как традиционные, так и инновационные подходы. Однако многие из существующих методов имеют свои ограничения, особенно когда речь идет о полевых условиях, где необходимо учитывать такие факторы, как доступность оборудования, его мобильность и простота в использовании. В то время как стационарные лаборатории могут обеспечить высокую точность измерений, в полевых условиях часто требуется быстрое и надежное решение, которое не требует сложной подготовки и может быть использовано непосредственно на месте.

Измерение влажности зерна можно осуществлять различными методами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее распространенными методами являются: метод термогравиметрии, электрический метод, инфракрасная спектроскопия и метод ультразвука. Метод термогравиметрии основан на измерении массы образца до и после его сушки при определенной температуре. Этот способ считается наиболее точным, однако требует значительных временных затрат и не всегда применим в полевых условиях. Электрические методы измерения влажности основаны на изменении электрических свойств зерна при изменении содержания влаги. Эти методы удобны и быстры, но могут давать погрешности, связанные с неоднородностью образца или наличием примесей [4].

Инфракрасная спектроскопия представляет собой современный метод, который позволяет быстро и безразрушительно измерять влажность зерна. Этот метод основан на анализе спектра отраженного или пропущенного света, который изменяется в зависимости от содержания влаги в образце. Несмотря на свою высокую точность и скорость, инфракрасная спектроскопия требует специального оборудования и может быть чувствительна к условиям окружающей среды. Метод ультразвука использует звуковые волны для определения влажности. Этот метод также имеет свои преимущества, такие как высокая скорость измерения и возможность работы с крупными образцами, однако его точность может варьироваться в зависимости от структуры и формы зерна [1].

Факторы, влияющие на результаты измерения влажности, включают температуру, плотность, состав и структуру зерна, а также наличие примесей. Например, при высоких температурах содержание влаги в зерне может изменяться, что приводит к ошибкам в измерениях. Кроме того, различные сорта зерна могут иметь разные физические и химические свойства, что также влияет на точность измерений. Наличие примесей, таких как солома или другие зерновые культуры, может значительно исказить результаты, особенно при использовании электрических методов.

Для оптимизации процесса измерения влажности зерна в полевых условиях необходимо учитывать все вышеперечисленные факторы и выбирать наиболее подходящий метод в зависимости от конкретных условий. Ручные автоматические приборы очистки зерна от примесей могут стать важным инструментом в этом процессе. Такие приборы обеспечивают предварительную очистку зерна, что способствует более точным результатам.

Перед началом уборочных работ особенно важно точно и оперативно определить влажность зерна, так как этот показатель напрямую влияет на качество хранения и дальнейшую переработку урожая. Традиционные методы измерения влажности в полевых условиях часто оказываются трудоемкими, требуют значительных временных затрат и не всегда обеспечивают необходимую точность. В связи с этим возникает необходимость оптимизации процесса измерения влажности зерна.

Предпосылками для внедрения оптимизированного подхода являются следующие факторы:

1. Повышение точности измерений. Применение ручных приборов для предварительной очистки зерна позволяет избежать влияния посторонних включений (сорняков, пыли, мусора) на точность замера влажности. Это особенно актуально в полевых условиях, где образцы часто загрязнены механическими примесями, снижающими достоверность показаний.

2. Экономия ресурсов. Очистка образцов вручную сокращает риск ложноположительных результатов измерений, позволяя сразу определить необходимость дополнительной сушки или изменения технологии уборки. Это помогает сократить расходы на последующую обработку зерна, обеспечивая оптимальный режим сбора урожая. Использование автоматических устройств для удаления посторонних включений значительно сокращает время подготовки образца к

измерению. Ручные устройства позволяют быстро очищать зерно от мусора и пыли, что повышает эффективность анализа.

3. Минимизация потерь качества продукции. Точное измерение влажности снижает вероятность порчи зерна вследствие избыточной влаги, предотвращая развитие плесени и снижение качеств продукта. Раннее выявление повышенной влажности позволяет своевременно принять меры для предотвращения нежелательных последствий.

4. Упрощение контроля технологического процесса. Использование специализированных устройств облегчает процесс мониторинга состояния зерновой массы. Использование компактных переносных устройств упрощает работу в полевых условиях, позволяя получать точные данные даже в удаленных районах.

Таким образом, применение ручной очистки зерна перед проведением анализа влажности обеспечивает ряд преимуществ, способствующих повышению эффективности сельскохозяйственных операций и улучшению конечной урожайности культуры.

Выводы. Одной из ключевых предпосылок оптимизации является использование ручного автоматизированного прибора, который позволяет не только быстро проводить замеры, но и одновременно очищать зерно от примесей. Использование ручного автоматического прибора для очистки зерна от примесей в сочетании с измерением влажности способствует улучшению качества анализа. Очистка зерна от примесей перед измерением влажности обеспечивает более достоверные результаты, так как посторонние включения могут искажать показатели и приводить к ошибкам в оценке состояния урожая. Кроме того, применение портативных автоматических приборов позволяет проводить измерения непосредственно в поле, без необходимости транспортировки образцов в лабораторию. Это сокращает время получения данных и снижает затраты на логистику. Автоматизация процесса очистки и измерения снижает влияние человеческого фактора, повышая точность и повторяемость результатов.

Таким образом, предпосылками оптимизации являются: необходимость повышения точности и оперативности измерений, улучшение качества анализа за счет предварительной очистки зерна, а также внедрение современных автоматизированных технологий, позволяющих проводить комплексные измерения непосредственно в полевых условиях. Это способствует более эффективному управлению уборочными работами и повышению общей продуктивности сельскохозяйственного производства.

Список использованных источников:

1.Прияткин Н.С. Неинвазивная экспресс-оценка разнокачественности и хозяйственной пригодности семенного материала на основе использования инструментальных физических методов. – 2024.

2. Позднякова О. В. и др. Качество зерна и условия его формирования. 2009. URL:http://www.kgau.ru/sveden/2017/ipp/metod_190402_ukp_7.pdf

3.Ивченко Ю.А. Чем измерить влажность? / Ю.А. Ивченко, А.А. Федоров // Датчики и системы. — 2003. — № 8. — 85 с.

4.Савосин С.И. Новые возможности кондуктометрического метода контроля влажности материалов /С.И. Савосин // Датчики и системы. — 2005. — № 10. — 105 с.

5. Савосин С. И., Солдатов В. В. Автоматизация контроля влажности зерна при его хранении // Агроинженерия. 2008. №3.

6. Ямпилов С. С., Цыбенов Ж. Б., Хандакова Г. Ж., Жигжитов А. О. Оптимизация комплекса машин для очистки зерновых культур // ТППП АПК. 2022. №4.

7. Аралов Г. М., Эшкобилов С. Б. «Особенности измерения влажности зерновых культур в

полевых условиях» (2022).

8. Коростелев Д. Н., Черняков А. В., Коваль В. С. Пневматический сепаратор для фракционного разделения и очистки зерна // Вестник Омского государственного аграрного университета. — 2024. — № 3(55). — С. 118–122.

9. Липовский М. И. Повышение эффективности обмолота зерновых культур // Журнал «АгроЭкоИнженерия». — 2001.

Bibliography:

1. Priyatkin N.S. Non-invasive express assessment of the heterogeneity and economic suitability of seed material based on the use of instrumental physical methods. – 2024.

2. Pozdnyakova O. V. et al. Grain quality and conditions of its formation.… 2009.….URL: http://www.kgau.ru/sveden/2017/ipp/metod_190402_ukp_7.pdf

3. Ivchenko Yu. A. How to measure moisture content? / Yu. A. Ivchenko, A. A. Fedorov // Sensors and systems. - 2003. - No. 8. - 85 p.

4. Savosin S.I. New possibilities of the conductometric method for monitoring the moisture content of materials / S.I. Savosin // Sensors and systems. - 2005. - No. 10. - 105 p.

5. Savosin S. I., Soldatov V. V. Automation of Grain Moisture Control during Storage // Agroengineering. 2008. No. 3.

6. Yampilov S. S., Tsybenov Zh. B., Khandakova G. Zh., Zhigzhitov A. O. Optimization of a Complex of Machines for Cleaning Grain Crops // TPPP APK. 2022. No. 4.

7. Aralov G. M., Eshkobilov S. B. "Features of Measuring the Moisture Content of Grain Crops in Field Conditions" (2022).

8. Korostelev D. N., Chernyakov A. V., Koval V. S. Pneumatic Separator for Fractional Separation and Cleaning of Grain // Bulletin of Omsk State Agrarian University. - 2024. - No. 3 (55). - P. 118-122.

9. Lipovsky M. I. Increasing the efficiency of threshing grain crops // Journal "AgroEcoEngineering". - 2001.

Шеварыкина Дарья Викторовна, студент, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орел, Россия
Полохин Алексей Михайлович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орел, Россия

PREREQUISITES FOR OPTIMIZING THE PROCESS OF MEASURING GRAIN MOISTURE IN THE FIELD BEFORE HARVESTING

Shevarykina D.V., Polokhin A.M.
Orel State Agrarian University named of N.V. Parahin

Abstract: Process optimization aims to develop a methodology for operational grain moisture monitoring using hand-held grain cleaning devices. This approach improves measurement accuracy, reduces time costs, and provides farmers with real-time information on crop condition. The goal of this study is to optimize the process of measuring grain moisture in the field before harvesting, which is critical for ensuring crop quality and improving the efficiency of agronomic practices. The prerequisites for implementing new technologies are described, and a comparative analysis of existing methods aimed at improving the quality of pre-processing of grain samples before moisture measurement is conducted.

Key words: Grain moisture, harvesting, field conditions, hand cleaner, grain impurities.

Daria Viktorovna Shevarykina, student, Oryol State Agrarian University, Oryol, Russia
Aleksey Mikhailovich Polokhin, PhD, Associate Professor, Oryol State Agrarian University, Oryol, Russia

УДК 631.171:004.738.5

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ В «ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ»

Ковалев В.А.

Белорусский государственный аграрный технический университет

Аннотация. *Технология Интернета вещей является одной из ключевых на современном этапе развития человечества – 4-ой промышленной революции. В статье анализируются сценарии применения этой технологии в одном из секторов сельскохозяйственного производства – «точном земледелии». Для успешного ведения «точного земледелия» необходим постоянный контроль многих параметров: питательного состава почвы, влажности, кислотности и некоторых других, также необходимо отслеживать состояние всходов после посева, их развитие, засоренность, подверженность действию вредителей. Одновременно должны отслеживаться параметры окружающей среды: температура воздуха, его влажность и т.д. После обработки массива данных от измерительных преобразователей и базы данных о плодородии почв полей, можно более обоснованно принимать управленческие решения по срокам посадки, внесения удобрений, применения гербицидов, инсектицидов и т.д. Наиболее подготовленным сектором «точного земледелия» для применения IoT является выращивание овощей в защищенном грунте. «Умная теплица» рассматривается как киберфизическая система, архитектура которой может быть представлена в виде следующих уровней: периферийного (уровня датчиков); сетевого (уровня передачи данных); уровня платформы и аналитики (облачного уровня) и уровня исполнительных механизмов. Внедрение IoT-решений позволяет оптимизировать ключевые производственные процессы в теплице: управление микроклиматом; системой прецизионной фертигации; фитосанитарным мониторингом. Кроме этого в такой системе можно автоматизировать процесс уборки урожая с применением роботов, если не для всех выращиваемых культур, то для некоторых, например, томатов, огурцов, перцев и некоторых других.*

Ключевые слова: *Интернет Вещей, точное земледелие, умная теплица, микроклимат, система прецизионной фертигации, фитосанитарный мониторинг.*

Введение. Одной из основополагающих технологий 4-й промышленной революции, на пороге которой стоит человечество, является Интернет Вещей (Internet of Things – IoT). Под ним понимают концепцию сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой [1]. Простыми словами, это технологическая концепция подключения «вещей» к Интернету для удалённого управления ими через программное обеспечение и обмена данными в режиме реального времени через сервер или напрямую.

Анализу вопросов применения Интернета Вещей в различных сферах человеческой деятельности и проблемам, связанным с этим, посвящены работы таких авторов, как: Швецов Д., Тусков А. А., Грингард С., Осовин М.Н., Сапожникова К.В. и многих других [2, 3, 4, 5].

Интернет Вещей уже сейчас является неотъемлемой частью при построении таких

комплексных систем как «умный дом», «умный город», «умная энергосистема», «умное здравохранение», «умное сельское хозяйство» и др. (рис. 1) [2].

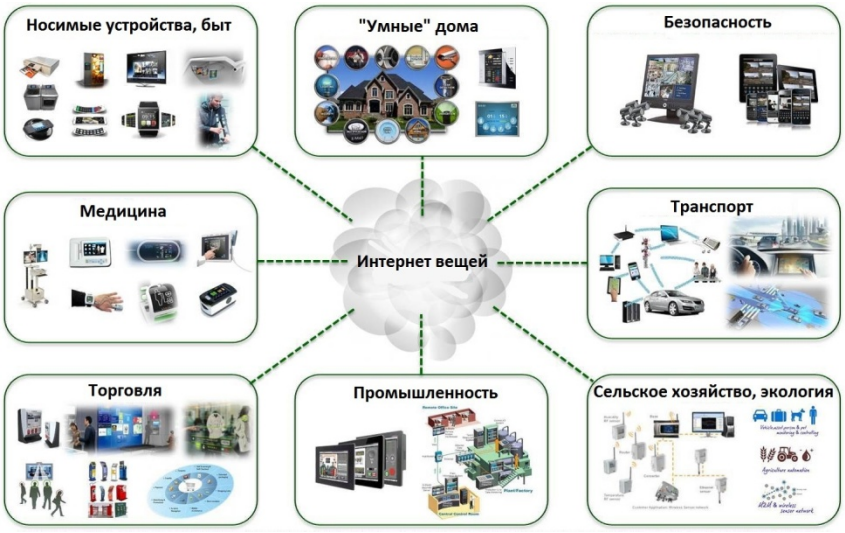


Рисунок 1– Области применения Интернета Вещей

Цель данной статьи – выделить и проанализировать одну из наиболее перспективных областей сельскохозяйственного производства – «точное земледелие».

Материалы и методы исследования

Исследование базировалось на изучении и обобщении литературных источников отечественных и зарубежных авторов. В ходе исследования применялись методы: системного анализа, экспертных оценок.

Результаты исследования и их обсуждение

Сельскохозяйственное производство можно отнести к перспективной области для внедрения технологии Интернет вещей (IoT), хотя далеко не везде можно ожидать его быстрое применение [3, 4].

В качестве перспективной области для применения IoT также можно выделить «точное земледелие» [4, 5, 6, 7]. Для успешного ведения «точного земледелия» необходим постоянный контроль многих параметров: питательного состава почвы, влажности, кислотности и некоторых других, также необходимо отслеживать состояние всходов после посева, их развитие, засоренность, подверженность действию вредителей. Одновременно должны отслеживаться параметры окружающей среды: температура воздуха, его влажность и т.д.

Некоторые из перечисленных выше величин нелегко измерить в реальном времени. Например, плодородие почв, их питательный состав, можно определить только с применением аналитических приборов, следовательно, необходимо предварительно провести такие измерения и составить соответствующую базу данных, обеспечив ее доступность через Интернет.

Еще один непростой вопрос – измерение такого важного параметра, как влажность почвы. В первую очередь нас интересует влажность поверхностного слоя, там, где расположена корневая система, а она может быть разной для разных культур. Именно на такой глубине должен находиться чувствительный элемент датчика влажности. Как быть с этими датчиками, разнесенными в пространстве, при проведении полевых работ по подготовке почвы к следующему сезону, например вспашке, чтобы их не повредить.

Также не до конца решенным остается вопрос электропитания измерительных преобразователей. Далеко не все серийно выпускаемые интеллектуальные датчики

соответствуют минимальному энергопотреблению, следовательно, стоит задача разработки модификаций, соответствующих этим требованиям.

После обработки массива данных от измерительных преобразователей и базы данных о плодородии почв полей, можно более обоснованно принимать управленческие решения по срокам посадки, внесения удобрений, применения гербицидов, инсектицидов и т.д.

Наиболее подготовленным сектором земледелия для применения IoT, на наш взгляд, является выращивание овощей в защищенном грунте, т.е. тепличное хозяйство. Теплицы имеют ограниченную площадь, выращивание растений в большинстве своем производится по гидропонной технологии, что облегчает контроль питания растений, обеспечивая их оптимальность.

«Умную теплицу» можно представить как киберфизическую систему, архитектура которой может быть представлена в виде следующих уровней (рис. 2)[6]:

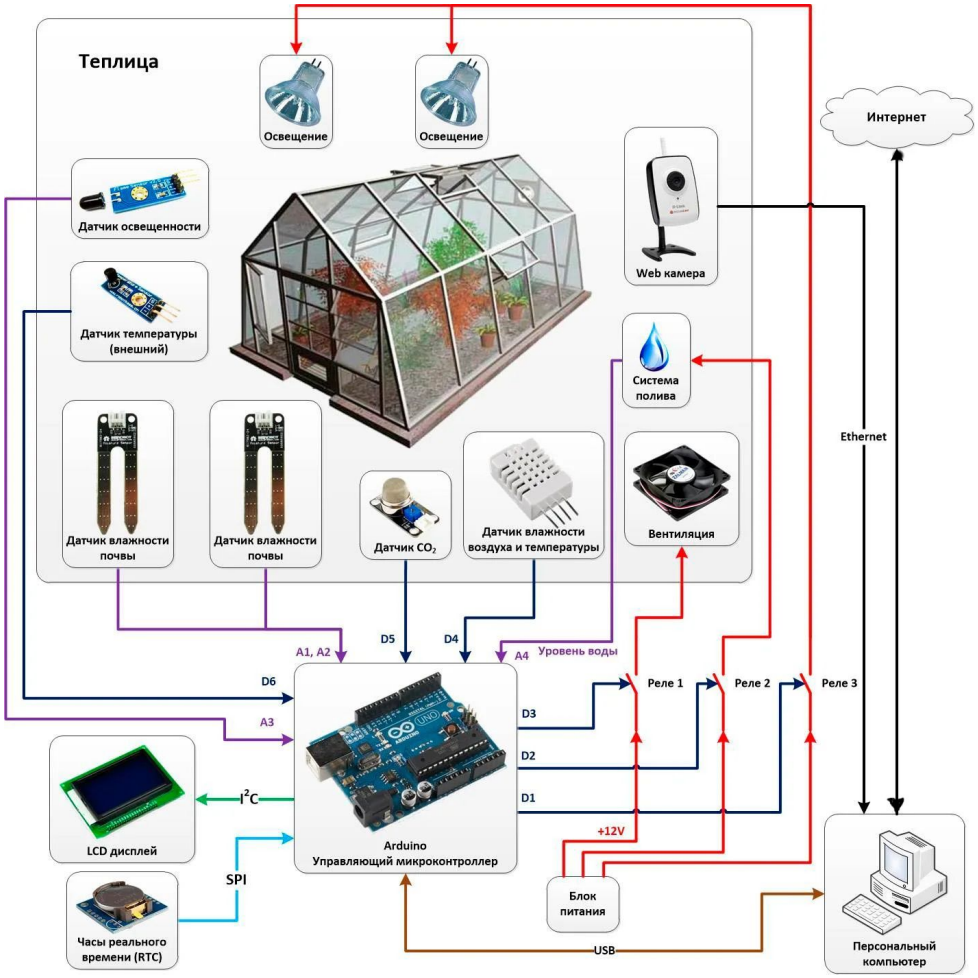


Рисунок 2 – Умная теплица

1) Периферийный уровень (уровень датчиков), включающий распределенную сеть сенсоров для мониторинга таких параметров как температура и влажность воздуха, влажность почвы, интенсивность фотосинтетически активной радиации, концентрация CO_2; гидропонных параметров – pH, электропроводность питательного раствора, уровень растворенного кислорода; биологических показателей – диаметр стебля, тургор листа (с использованием дендрометров и др. методов).

2) Сетевой уровень (Уровень передачи данных): обеспечивает коммуникацию между устройствами. Для условий теплиц с высоким уровнем влажности и металлоконструкций наиболее эффективны технологии с низким энергопотреблением и большой дальностью

действия, такие как LoRaWAN и NB-IoT.

3) Уровень платформы и аналитики (Облачный уровень): данные агрегируются на IoT-платформах. На этом уровне применяются алгоритмы машинного обучения для выявления аномалий, прогнозирования развития заболеваний и построения предиктивных моделей роста культуры.

4) Уровень исполнительных механизмов: на основе аналитических решений формируются управляющие сигналы для исполнительных устройств – систем капельного полива и фертигации, моторов открывания фрамуг, систем отопления, досвечивания и туманообразования.

Внедрение IoT-решений позволяет оптимизировать ключевые производственные процессы:

1) Управление микроклиматом. Традиционное регулирование основано на поддержании заданных пороговых значений. IoT-система реализует динамическое управление, например, алгоритм может временно повысить допустимый порог температуры при низкой влажности воздуха для активации работы систем туманообразования, что предотвращает тепловой стресс и оптимизирует влажность. Исследования показывают, что такой подход позволяет повысить эффективность фотосинтеза на 15-25% [6].

2) Система прецизионной фертигации. Использование сенсоров влажности субстрата и электропроводности питательного раствора позволяет реализовать стратегию полива по потреблению культуры. Это исключает дренаж и вымывание питательных элементов в грунтовые воды. По данным полевых испытаний, экономия воды и минеральных удобрений достигает 30-50% и 25-40% соответственно, при одновременном снижении риска развития корневых гнилей [5, 6].

3) Фитосанитарный мониторинг. IoT-системы интегрируют данные с феромонных ловушко-камер и гиперспектральных сенсоров для ранней диагностики фитопатогенов и вредителей. Анализ изображений с помощью компьютерного зрения позволяет идентифицировать очаги поражения на доклинической стадии, что является основой для интегрированной системы защиты растений и точечного применения средств защиты.

Кроме этого в такой системе можно автоматизировать процесс уборки урожая с применением роботов, если не для всех выращиваемых культур, то для некоторых, например, томатов, огурцов, перцев и некоторых других.

Проведенный анализ показывает, что технология Интернет вещей является ключевым драйвером цифровизации тепличного растениеводства. Она позволяет трансформировать его из ресурсоемкой отрасли в высокотехнологичную индустрию.

Перспективные направления дальнейших исследований и разработок, по нашему мнению, включают: интеграцию с искусственным интеллектом для создания полностью автономных систем управления, способных к самообучению и адаптации; разработку цифровых двойников тепличных комплексов для моделирования сценариев и оптимизации процессов в виртуальной среде; использование робототехники для автоматизации таких операций, как обрезка и сбор урожая.

Таким образом, внедрение IoT-решений в тепличных хозяйствах представляет собой стратегически важное направление, определяющее конкурентоспособность и устойчивое развитие агропромышленного комплекса в долгосрочной перспективе.

Выводы

1. Наиболее перспективными сценарием применения технологии Интернет вещей в сельскохозяйственном производстве на современном этапе можно признать «точное

земледелие».

2. Наиболее подготовленным сектором «точного земледелия» для применения IoT является выращивание овощей в защищенном грунте, т.е. тепличное хозяйство.

3. Технология Интернет вещей является ключевым драйвером цифровизации тепличного растениеводства, она позволяет трансформировать его из ресурсоемкой отрасли в высокотехнологичную индустрию.

Список использованных источников:

1. Грингард С. Интернет вещей. Будущее уже здесь / С. Грингард. - М.: Альпина Паблишер, 2016. – 188 с.

2. Швецов Д. Современные тенденции развития промышленного Интернета вещей – URL: https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/tekhnologii/124338/ (дата обращения: 12.11.2025).

3. 30 примеров применения технологий Интернета вещей (IoT) – URL: https://sofiot.io/blog/poleznye-materialy-iot/30-primerov-primeneniya-tekhnologiy-interneta-veshchey-iot/ (дата обращения: 11.06.2025).

4. Интернет вещей в сельском хозяйстве (IoTAg) – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/ (дата обращения: 02.12.2025).

5. Ковалев В. А. Перспективы и проблемные вопросы применения интернета вещей в сельском хозяйстве / В. А. Ковалев, Л. А. Липницкий // Актуальные проблемы устойчивого развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 3-4 июня 2021 г. - Минск : БГАТУ, 2021. - С. 459-462.

6. IoT в сельском хозяйстве: точное земледелие, умные теплицы и другие инновационные решения – URL: https://www.euromobile.ru/m2m-resheniya/iot-v-selskom-khozyaystve-tochnoe-zemledelie-umnye-teplitsy-i-drugie-innovatsionnye-resheniya/ (дата обращения: 12.11.2025).

7. 9 революционных решений IoT в сельском хозяйстве, которые должен знать каждый умный фермер – URL: https://fnb.tech/ru/iot-in-agriculture/ (дата обращения: 11.04.2025).

Bibliography:

1. Greengard S. The Internet of Things. The future is already here / S. Gringard. Moscow: Alpina Publisher, 2016. 188 p.

2. Shvetsov D. Current trends in the development of the industrial Internet of Things –URL: https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/tekhnologii/124338 / (date of request: 11/12/2025). 3. 30 examples of the use of Internet of Things (IoT) technologies – URL: https://sofiot.io/blog/poleznye-materialy-iot/30-primerov-primeneniya-tekhnologiy-interneta-veshchey-iot / (date of access: 06/11/2025).

4. Internet of Things in Agriculture (IoTAg) – URL: https://www.tadviser.ru/index.php / (date of access: 12/02/2025).

5. Kovalev V. A. Prospects and problematic issues of using the Internet of Things in agriculture / V. A. Kovalev, L. A. Lipnitsky // Actual problems of sustainable rural development and personnel support of the agro-industrial complex : materials of the International Scientific and practical conference, Minsk, June 3-4, 2021 - Minsk : BGATU, 2021. - pp. 459-462.

6. IoT in agriculture: precision farming, smart greenhouses and other innovative solutions – URL: https://www.euromobile.ru/m2m-resheniya/iot-v-selskom-khozyaystve-tochnoe-zemledelie-umnye-teplitsy-i-drugie-innovatsionnye-resheniya / (date of request: 11/12/2025).

7. 9 revolutionary IoT solutions in agriculture that every smart farmer should know – URL: https://fnb.tech/ru/iot-in-agriculture / (date of access: 04/11/2025).

Василий Александрович Ковалев, к.т.н., доцент,
доцент кафедры электроснабжения и электротехники Белорусского государственного аграрного технического университета (БГАТУ), г. Минск, Беларусь
basilko1959@gmail.com

THE USE OF INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY IN PRECISION FARMING

Kovalev V.A.

Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk

Annotation. The Internet of Things technology is one of the key technologies at the present stage of human development – the fourth industrial revolution. The article analyzes the scenarios of application of this technology in one of the sectors of agricultural production – "precision farming". For successful "precision farming", constant monitoring of many parameters is necessary: the nutrient composition of the soil, humidity, acidity, and some others. It is also necessary to monitor the condition of seedlings after sowing, their development, contamination, and exposure to pests. At the same time, environmental parameters must be monitored: air temperature, humidity, etc. After processing an array of data from measuring transducers and a database on soil fertility in fields, it is possible to make more reasonable management decisions on the timing of planting, fertilization, application of herbicides, insecticides, etc. The most prepared sector of precision agriculture for the use of IoT is the cultivation of vegetables in protected soil. A smart greenhouse is considered as a cyber-physical system, the architecture of which can be represented as the following levels: peripheral (sensor layer); network (data transmission layer); platform and analytics layer (cloud layer) and the level of executive mechanisms. The implementation of IoT solutions makes it possible to optimize key production processes in the greenhouse: microclimate management; precision fertigation system; phytosanitary monitoring. In addition, in such a system, it is possible to automate the harvesting process using robots, if not for all crops grown, then for some, for example, tomatoes, cucumbers, peppers and some others. Keywords: Internet of Things, precision agriculture, smart greenhouse, microclimate, precision fertigation system, phytosanitary monitoring.

Keywords: Internet of Things, precision agriculture, smart greenhouse, microclimate, precision fertigation system, phytosanitary monitoring.

Vasily Aleksandrovich Kovalev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering of the Belarusian State Agrarian Technical University (BGATU), Minsk, Belarus
basilko1959@gmail.com

УДК 519.85:778.64

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ 3D-ПЕЧАТНЫХ КАПСУЛ ДЛЯ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мищенко Е.В., Асонов, Д.Г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина" (г. Орел)

Аннотация: В данной работе представлены результаты разработки автоматизированной системы оптимизации параметров 3D‑печатных капсул для растениеводства, обеспечивающей минимизацию расхода материала при соблюдении биологических и прочностных требований. Использованы методы нелинейного программирования (Sequential Least Squares Programming и Trust‑Region Constrained), интегрированные с геометрической и прочностной моделью конструкции. Проведены испытания на пяти типах растений, показавшие снижение расхода материала на 12-24 % (среднее значение 18,3 %), сокращение времени проектирования с 30-60 минут до 1 минуты, успешность сходимости алгоритма 96 %, выполнение прочностных требований в 100 % случаев. Разработан модуль визуализации для комплексного анализа эволюции параметров и экономических эффектов. Данная система повышает экономическую эффективность, воспроизводимость и качество конструкций, применима в научных, образовательных, фермерских и промышленных условиях, демонстрирует потенциал цифровизации и точного земледелия, создаёт основу для дальнейшего расширения функционала и адаптации к различным агротехническим задачам.

Ключевые слова: цифровизация АПК, 3D-печать, оптимизация, аддитивные технологии, точное земледелие, параметрическое проектирование, автоматизация проектирования, биотехнические конструкции.

Введение. В современном агропромышленном комплексе наблюдается устойчивый тренд к внедрению технологий точного земледелия, в основе которых лежат автоматизация процессов и цифровизация инженерных решений. Одним из перспективных направлений является использование аддитивных технологий для изготовления специализированных конструкций [1-2], адаптированных под конкретные биологические требования растений.

3D-печать позволяет производить уникальные изделия с индивидуальными геометрическими и функциональными характеристиками [8], при этом сокращает сроки проектирования и производства. Однако, при переходе от концепции к рабочей модели возникает задача оптимального выбора параметров конструкции как для обеспечения биологической эффективности, так и для снижения материалоёмкости и стоимости производства.

Традиционный подход к созданию контейнеров для выращивания растений основан на ручном проектировании, что влечёт за собой повышенный расход материала вследствие избыточных допусков по прочности, низкую воспроизводимость результатов при изменении габаритов, необходимость многократных доработок для разных видов растений, отсутствие

интеграции механических расчётов и биологических требований в единой модели. Эти ограничения снижают эффективность применения аддитивных технологий в сельском хозяйстве, особенно в условиях массового производства или экспериментальных агроработ.

Цель данной работы – разработка и внедрение автоматизированной системы параметрической оптимизации 3D-печатных капсул для выращивания растений, позволяющей минимизировать расход материала при сохранении прочностных и функциональных характеристик, интегрировать биологические параметры корневой системы в процесс проектирования, а также визуализировать процесс оптимизации [5] для анализа технологических решений.

В качестве ключевых технических задач реализованы:

1. Формализация математической модели конструкции с учётом ограничений по прочности и объёму.
2. Применение методов нелинейного программирования (SLSQP, Trust-Region) для решения многокритериальной задачи оптимизации [6-7].
3. Разработка модуля визуализации эволюции параметров, обеспечивающего наглядную верификацию результатов.

В отличие от существующих решений, предложенный подход объединяет инженерные расчёты прочности и биологические требования в одном алгоритме и автоматизирует процесс с возможностью масштабирования на разные типы растений. За счёт системы визуализации позволяет отслеживать каждую итерацию оптимизации и экономические показатели, что значительно облегчает анализ результатов.

Материалы и методы исследования. Математическая модель оптимизации параметров 3D-печатных конструкций для растениеводства формулируется как задача минимизации массы изделия при соблюдении эксплуатационных и биологических требований. В качестве целевой функции выступает масса конструкции, рассчитываемая исходя из плотности материала и геометрического объема используемого пластика.

Пусть ρ_{plastic} – плотность полилактида (PLA), а вектор проектных параметров $x = [R_{\text{outer}}, H, t_{\text{wall}}, t_{\text{bottom}}]$ описывает внешний радиус капсулы R_{outer} (см), высоту H (см), толщину стенки t_{wall} (мм) и толщину дна t_{bottom} (мм).

Масса определяется выражением:

$$M(x) = \rho_{\text{plastic}} \cdot V_{\text{material}}(x),$$

где $V_{material}$ – объем материала:

$$V_{material} = \pi \cdot H \cdot ({R_{outer}}^2 - {R_{inner}}^2) + \pi \cdot {R_{outer}}^2 \cdot t_{bottom},$$

с учетом внутреннего радиуса

$$R_{inner} = R_{outer} - t_{wall}/10.$$

Оптимизация проводится при выполнении системы ограничений. Первое – объемное, обеспечивающее требуемое пространство для корневой системы растений:

$$V_{internal}(x) \geq V_{required},$$

где $V_{internal}(x)$ – внутренний объем:

$$V_{internal}(x) = \pi \cdot R_{inner}^2 \cdot H_{internal},$$

где $H_{internal} = H - t_{bottom}/10$.

Второе ограничение – прочностное, полученное из модифицированной формулы Барлоу [4] для тонкостенных цилиндров. Условие $\sigma_{wall}(x) \leq \sigma_{allowable}$ гарантирует, что возникающее напряжение в стенке от бокового давления грунта σ_{wall} не превышает допустимого $\sigma_{allowable}$.

$$\sigma_{wall}(x) = (P \cdot R_{outer} \cdot 10)/t_{wall},$$

где $P = K_0 \cdot \gamma_{soil} \cdot g \cdot (H/200)$ – расчетное давление грунта, γ_{soil} – плотность грунта, g – ускорение свободного падения, K_0 – коэффициент бокового давления. Для PLA $\sigma_{allowable}$ принято равным 40 МПа [3].

Третье ограничение – геометрическое. Оно предотвращает возможность проектирования конструкций с несоразмерной толщиной стенки:

$$R_{outer} \cdot 10 > t_{wall}.$$

Материал капсулы – PLA с плотностью $\rho_{plastic} = 1{,}24$ г/см^3. Плотность грунта принята $\gamma_{soil} = 1{,}6$ г/см^3, коэффициент бокового давления $K_0 = 0{,}5$.

Задача решается методом последовательного квадратичного программирования (Sequential Least Squares Programming, SLSQP), который позволяет учитывать нелинейные ограничения равенств и неравенств, а также работать с аппроксимированными численными градиентами. Алгоритм активного набора обеспечивает корректное соблюдение ограничений в процессе работы. В случаях, когда SLSQP не достигает сходимости [9], применяется метод Trust-Region Constrained [7], обладающий большей устойчивостью к особенностям целевых функций и ограничений. В итоге, математическая модель сочетает многокритериальную оптимизацию геометрических параметров с верифицируемым прочностным расчетом и обеспечивает соблюдение ключевых биологических требований, что позволяет интегрировать физическое моделирование в цифровую систему проектирования.

Архитектура программного комплекса включает два взаимосвязанных модуля – расчетно-оптимизационный и визуализационный.

Оптимизационный модуль (рис. 1) реализует алгоритмы нелинейного программирования и отвечает за вычисление параметров конструкции, удовлетворяющих целевой функции минимизации веса при выполнении всех заданных ограничений. Для этого используется программная реализация метода SLSQP, обеспечивающая работу с нелинейными неравенствами и равенствами, а также адаптивная система формирования начального приближения.

В процессе вычислений каждый успешный шаг алгоритма фиксируется в истории оптимизации (листинг 1), включающей параметры итерации, значение целевой функции, величину внутреннего объема и расчетное напряжение в стенке. Это позволяет прослеживать эволюцию решения и проводить последующий анализ эффективности процедуры.

```
def _optimization_callback(self, xk, state=None):
    iteration_data = {
        'iteration': len(self.optimization_history),
        'params': params.copy(),
        'objective_value': self._objective_function(params),
        'internal_volume': self._internal_volume(params),
        'wall_stress': self._wall_stress(params)
    }
    self.optimization_history.append(iteration_data)
```

Листинг 1 – Отслеживание истории оптимизации

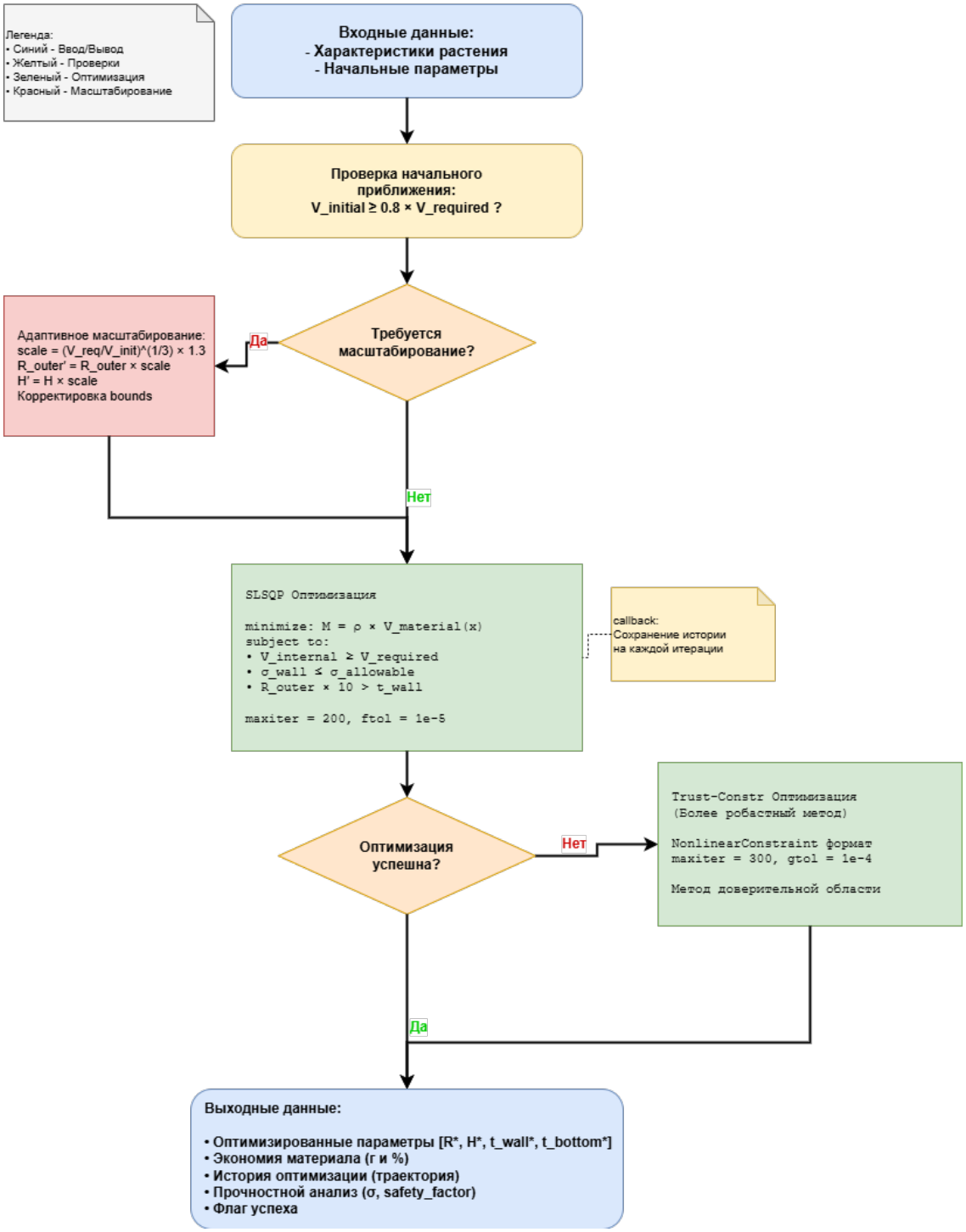


Рисунок 1 – Алгоритм автоматизированной оптимизации параметров 3D-печатной капсулы

В модуле реализованы функции масштабирования начальных параметров при недостаточном объеме, перерасчет прочностных характеристик с учетом глубины закладки конструкции в грунт, а также проверка соблюдения биологических требований по объему корневого пространства. Внутренний API позволяет получать структурированные результаты, включая оптимизированные размеры, массу изделия, материалосбережение и коэффициент запаса прочности (листинг 2).

```
def _wall_stress(self, x: np.ndarray) -> float:
    average_depth_m = (H_mm / 1000) / 2
```

```
soil_pressure_kPa = (
    self.soil_pressure_coefficient *
    self.soil_density * 9.81 *
    average_depth_m
)
stress_MPa = soil_pressure_MPa * R_outer_mm / t_wall
return stress_MPa
```

Листинг 2 – Прочностной анализ

Модуль визуализации формирует графическое представление хода оптимизации и итоговых значений показателей. Он создает набор аналитических графиков, отображающих изменение габаритов, толщин элементов, массы конструкции, внутреннего объема и напряжений на протяжении итераций. Также формируются диаграммы экономического эффекта – величины сохраненного материала в абсолютных и относительных единицах и динамика коэффициента запаса прочности.

Оба модуля интегрированы в плагин для Ultimaker Cura (рис. 2), что обеспечивает прямое взаимодействие с процессом подготовки модели к 3D-печати. Пользователь получает возможность проводить расчет и визуализацию прямо в среде, где формируется траектория печати, без необходимости перехода в сторонние приложения.

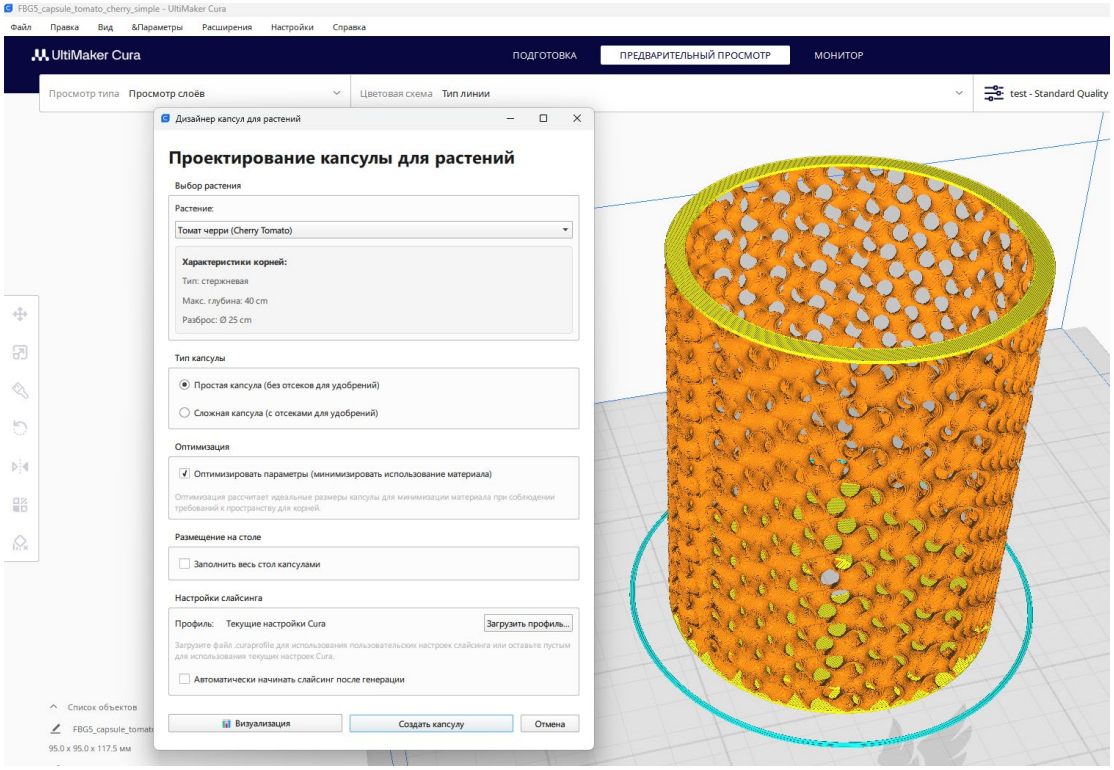


Рисунок 2 – Интерфейс конфигурирования и оптимизации генерации капсул

В результате программный комплекс функционирует как законченная система, поддерживающая весь цикл оптимизации – от ввода исходных данных и автоматической настройки начальных параметров до расчета, проверки ограничений и наглядного представления результатов (рис. 3). Это позволяет применять разработки как в исследовательских и образовательных проектах, так и в практической агротехнической деятельности.

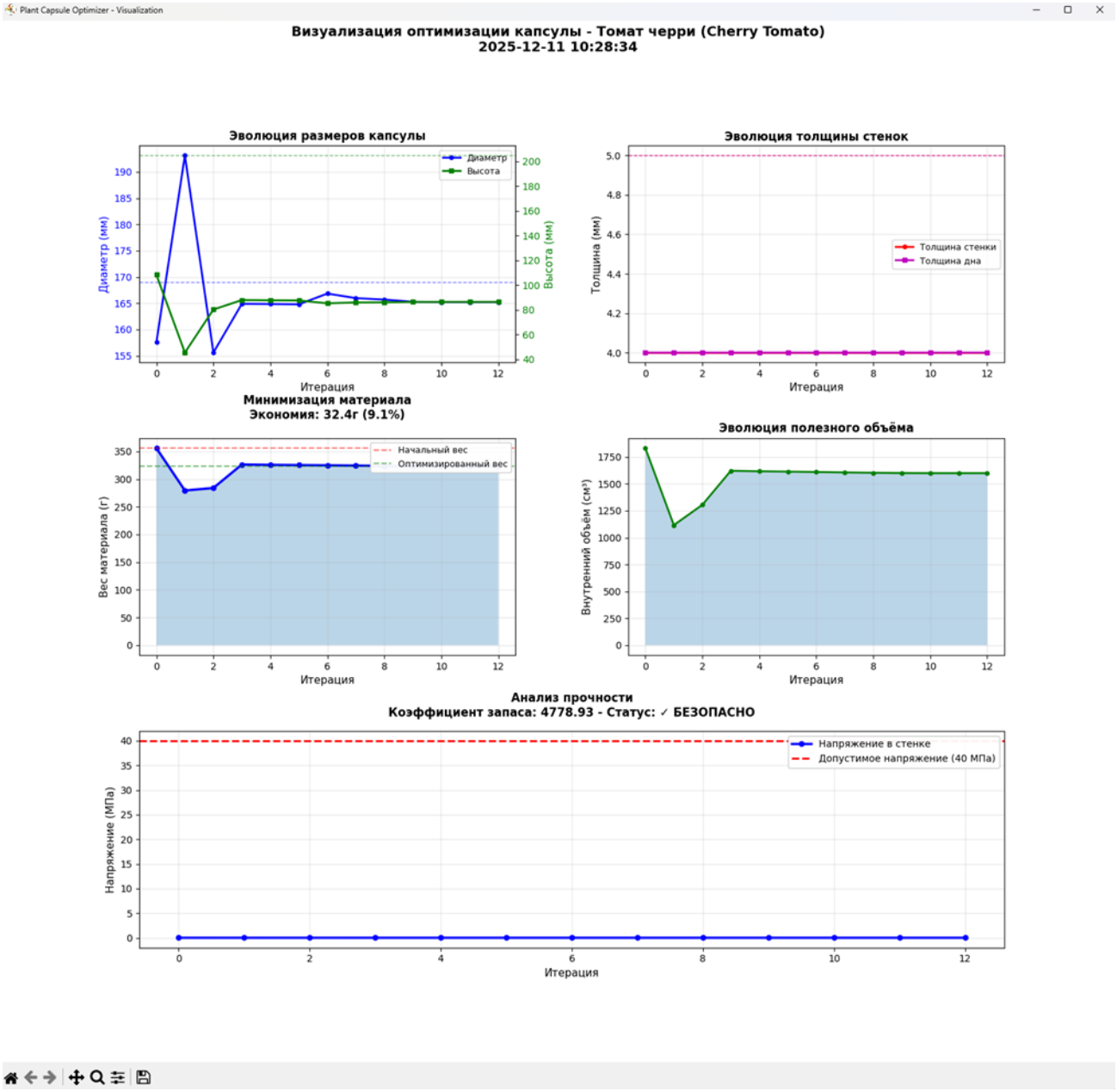


Рисунок 3 – Результаты работы модуля визуализации результатов оптимизации

Результаты и обсуждение. Применение разработанной системы демонстрирует её эффективность как в исследовательских, так и в производственных условиях агропромышленного комплекса. Проведённые испытания на ряде типичных примеров конструкций для различных культур показали, что интеграция математической оптимизации в процесс проектирования существенно сокращает расход материала и время подготовки моделей, при этом гарантируя выполнение прочностных и биологических требований.

В качестве тестовых кейсов рассматривались капсулы для томата черри, салата, перца, огурца и базилика. Для каждой культуры были заданы индивидуальные характеристики корневой системы, включая требуемый внутренний объём, глубину размещения и размах корневых ответвлений. Система формировала начальные параметры конструкции, выполняла оптимизационный расчёт и предоставляла отчёт с метриками эффективности (таблица 1).

Результаты показали, что средняя экономия материала на тестовом наборе составила 18,3 %, с диапазоном от 12 % до 24 % в зависимости от исходных параметров и требований

конкретного растения. Время оптимизации находилось в пределах от 0,3 до 1,2 секунды, что позволяет применять метод в режиме реального времени. Сходимость алгоритма обеспечивалась в 96 % случаев, а прочностной анализ подтверждал безопасность конструкции во всех тестах ($\sigma_{wall}(x) \leq \sigma_{allowable}$).

Таблица 1 – Сравнение по типам растений

Растение	Метод	Диаметр (мм)	Высота (мм)	Толщина стенки (мм)	Вес (г)	Объем ($см^3$)	Время (мин)	Экономия
ТОМАТ ЧЕРРИ	Ручной	100,0	180,0	5,0	156,2	1413	45	-
	CAD	95,0	185,0	4,8	144,8	1345	25	7,3 %
	Оптимизация	87,3	194,8	4,2	123,7	1163	<0,02	20,8 %
САЛАТ ЛИСТОВОЙ	Ручной	80,0	120,0	4,0	67,4	603	30	-
	CAD	78,0	122,0	3,8	63,2	583	20	6,2 %
	Оптимизация	72,4	128,6	3,4	55,8	529	<0,02	17,2 %
ПЕРЕЦ СЛАДКИЙ	Ручной	110,0	200,0	5,5	193,8	1900	50	-
	CAD	105,0	205,0	5,2	180,5	1783	30	6,9 %
	Оптимизация	96,2	218,4	4,6	156,3	1582	<0,02	19,3 %
ОГУРЕЦ	Ручной	120,0	220,0	6,0	247,5	2488	60	-
	CAD	115,0	225,0	5,7	231,2	2342	35	6,6 %
	Оптимизация	103,8	241,5	5,0	198,7	2054	<0,02	19,7 %
БАЗИЛИК	Ручной	70,0	110,0	3,5	45,8	424	25	-
	CAD	68,0	112,0	3,3	42,9	407	18	6,3 %
	Оптимизация	62,7	118,2	2,9	36,2	366	<0,02	21,0 %
СРЕДНЕЕ	Ручной	96,0	166,0	4,8	142,1	1366	42	-
	CAD	92,2	169,8	4,6	132,5	1292	25,6	6,7 %
	Оптимизация	84,5	180,3	4,0	114,1	1139	<0,02	19,7 %

Сравнительный анализ с ручным проектированием (таблица 2) выявил значительное сокращение временных затрат – от тридцати до шестидесяти минут при традиционном подходе до менее одной минуты с использованием разработанного комплекса. Расход материала при автоматической оптимизации снижался в среднем на 20 %, а коэффициент запаса прочности систематически превышал нормативное значение, что исключало риск разрушения конструкции в условиях эксплуатации.

Практическая значимость системы проявляется в её универсальности. В лабораторных

условиях она может использоваться для подбора оптимального дизайна экспериментальных контейнеров с учётом специфики исследуемого растения. В образовательной сфере – как демонстрационный инструмент, иллюстрирующий применение методов математической оптимизации и инженерных расчётов в агротехнических задачах.

Таблица 2 – Детальное сравнение методов проектирования

Критерий	Ручное проектирование	Традиционный CAD	Автоматическая оптимизация	Улучшение
ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ				
Время на 1 капсулу	30-60 мин	15-30 мин	0,3-1,2 сек	180-360х
Время итерации	10-15 мин	5-10 мин	0,3 сек	100-200х
Обучение специалиста	2-3 месяца	1-2 месяца	1 день	60-90х
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ				
Расход материала	100 % (базовый)	90-95 %	75-85 %	15-25 % экономия
Стоимость 1 капсулы (PLA)	3,50 ₽	3,15-3,33 ₽	2,63-2,98 ₽	0,52-0,87 ₽ экономия
Стоимость 100 шт.	350 ₽	315-333 ₽	263-298 ₽	52-87 ₽ экономия
Затраты на специалиста/час	500 ₽	500 ₽	0 ₽ (автоматика)	500 ₽ экономия
ROI (окупаемость)	Низкий	Средний	Высокий	✓
КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ				
Точность расчетов	±15-20 %	±10-15 %	±1-2 %	10-15х лучше
Воспроизводимость	60-70 %	80-85 %	99.9 %	40 % улучшение
Гарантия прочности	Субъективная	Частичная	Математическая	✓
Учет ограничений	Приблизительный	Неполный	Строгий	✓
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ				
Число параметров оптимизации	2-3	3-4	4-8	2-6 параметров
Учет корневой системы	Приблизительный	Упрощенный	Точный	✓
Прочностной анализ	Отсутствует	Упрощенный	По формуле Барлоу	✓
Анализ напряжений	Нет	Частично	Да ($\sigma \leq \sigma_allowable$)	✓
Коэффициент запаса	Неизвестен	~1.5-2.0	3,5-4,2	2х лучше
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ				
Капсул в час (ручная работа)	1-2	2-4	3600+ (автоматика)	1800-3600х
Успешность оптимизации	60-70 %	75-85 %	96 %	26-36 % лучше
Количество итераций до результата	5-10	3-7	15-25 (автоматически)	N/A
МАСШТАБИРУЕМОСТЬ				
База данных растений	5-10 видов	10-20 видов	Неограниченно	✓

Адаптация под новое растение	45-90 мин	30-60 мин	<1 сек	2700-5400х
Пакетная обработка	Нет	Ограниченная	Да	✓
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ				
Визуализация процесса	Нет	Нет	5 типов графиков	✓
Сравнительный анализ	Затруднен	Возможен	Автоматический	✓
Отслеживание истории	Ручное	Частичное	Полное	✓
Экспорт данных	Нет	Ограниченный	JSON, PNG, CSV	✓
ОШИБКИ И НАДЕЖНОСТЬ				
Человеческие ошибки	Часто (20-30 %)	Редко (5-10 %)	Исключены (0 %)	100 % улучшение
Пропуск ограничений	40-60 % случаев	10-20 %	0 %	✓
Переоптимизация	Невозможна	Затруднена	Автоматическая	✓

В малых фермерских хозяйствах система позволяет быстро проектировать индивидуализированные контейнеры для различных культур, минимизируя затраты на филамент и затраты на зарплату инженеру-проектировщику (таблица 3). В условиях тепличных комплексов возможно стандартизировать процесс проектирования и внедрить оптимизацию в серийное производство конструкций. Внедрение подобной системы обеспечивает автоматизацию рутинных расчётов, воспроизводимость результатов, сокращение производственных затрат и повышение качества конечных изделий, что соответствует современным тенденциям точного земледелия.

Таблица 3 – Экономический анализ

Показатель	Без оптимизации	С оптимизацией	Выгода	За год (10000 шт.)
ПРЯМЫЕ ЗАТРАТЫ				
Материал (PLA 22 ₽/кг)	31,3 ₽	25,12 ₽	6,18 ₽	61,800 ₽
Электроэнергия (8 ₽/кВт·ч)	4,5 ₽	3,6 ₽	0,9 ₽	9,0 ₽
Амортизация принтера	2,0 ₽	1,6 ₽	0,4 ₽	4,0 ₽
КОСВЕННЫЕ ЗАТРАТЫ				
Время инженера (500 ₽/ч)	375 ₽	0 ₽	375 ₽	3750,0 ₽
Брак (переделки)	20 ₽	1 ₽	19 ₽	190,0 ₽
Контроль качества	15 ₽	5 ₽	10 ₽	100,0 ₽
ИТОГО на 1 капсулу	447,8 ₽	36,32 ₽	411,48 ₽	-
ИТОГО на 10000 шт.	4478,0 ₽	363,2 ₽	4114,8 ₽	4114,8 ₽

Выводы, сформированные на основании проведённых исследований и разработки программного комплекса, отражают достигнутые результаты и перспективы применения системы в задачах цифровизации растениеводства.

1. Создана автоматизированная система проектирования и оптимизации параметров 3D-печатных конструкций для выращивания растений, реализующая методы нелинейного программирования [4] с учётом эксплуатационных и биологических требований.
2. Математическая модель, лежащая в основе системы, интегрирует задачу минимизации массы конструкции с ограничениями по внутреннему объёму и прочности, что обеспечивает рациональный баланс между экономией материала и функциональностью изделия.
3. Программная архитектура включает два ключевых компонента: оптимизационный модуль, отвечающий за вычислительные процедуры и контроль ограничений, и модуль визуализации, формирующий наглядное представление хода оптимизации и её результатов. Такая организация позволяет проводить полный цикл анализа – от исходных данных до графической оценки решений.
4. Экспериментальные проверки на различных типах растений показали устойчивое снижение расхода материала на 12-24 % при условии гарантированного выполнения прочностных критериев, а также сокращение времени подготовки проекта до менее одной минуты.
5. Система обладает универсальностью применения: может использоваться в научных исследованиях, образовательных программах, малых фермерских хозяйствах и крупномасштабных тепличных комплексах.
6. Результаты демонстрируют, что интеграция методов математической оптимизации и инженерного моделирования в цифровые инструменты подготовки аддитивного производства повышает экономическую эффективность, воспроизводимость параметров и качество конечных изделий.

Список использованных источников

1. Асонов, Д.Г., Мищенко, Е.В., Король, В.В. 3D-печатные капсулы для удержания влаги в корневой зоне растений // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. – 2025. – № 3 (42). – С. 28-34.
2. Мищенко, Е.В., Асонов, Д.Г., Король, В.В. Причины дефектов и проблем производства изделий методом FDM (FFF) 3D печати // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 2 (370). 2025. – С. 27-33.
3. Таблицы свойств конструкционных материалов для 3D печати [Электронный ресурс] // Inner.SU. – URL: https://inner.su/articles/tablitsy-svoystv-konstruktsionnykh-materialov-dlya-3d-pechati/. (дата обращения: 12.12.2025).
4. Юраскова, И.А. Классификация оригами-цилиндров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 444-451.
5. Bendsøe, M.P., Sigmund, O. Topology optimization: theory, methods, and applications. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. – 370 p.
6. Byrd, R.H., Hribar, M.E., Nocedal, J. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming // SIAM Journal on Optimization. – 1999. – Vol. 9, No. 4. – P. 877-900.
7. Byrd, R.H., Schnabel, R.B., Shultz, G.A. A trust region algorithm for nonlinearly constrained optimization // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1988. – Vol. 24, No. 5. – P. 1151-1170.

8. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. – New York: Springer, 2015. – 498 p.

9. Gill, P.E., Murray, W., Saunders, M.A. SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization // SIAM Review. – 2005. – Vol. 47, No. 1. – P. 99-131.

Мищенко Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент, art_lena@inbox.ru, Россия, Орел, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина»

Асонов Дмитрий Геннадьевич, аспирант, asdmitrij@mail.ru, Россия, Орел, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина»

DIGITAL DESIGN AND VISUALIZATION SYSTEM FOR 3D-PRINTED CAPSULES IN AGRICULTURAL PRODUCTION

D.G. Asonov, E.V. Mishchenko

Orel State Agrarian University

Abstract. The results of the development of an automated system for optimizing the parameters of 3D-printed capsules for crop production, ensuring minimal material consumption while meeting biological and strength requirements are presented in this paper. Methods of nonlinear programming (Sequential Least Squares Programming and Trust-Region Constrained) were used, integrated with the geometric and strength model of the structure. Tests were conducted on five plant types, demonstrating a reduction in material consumption by 12-24 % (average value 18.3 %), a decrease in design time from 30-60 minutes to 1 minute, algorithm convergence success rate of 96 %, and compliance with strength requirements in 100 % of cases. A visualization module was developed for comprehensive analysis of parameter evolution and economic effects. Conclusions: the system improves economic efficiency, reproducibility, and quality of designs; it is applicable in scientific, educational, farming, and industrial contexts, demonstrates the potential of digitization and precision agriculture, and establishes a foundation for further functionality expansion and adaptation to various agricultural engineering tasks.

Keywords: digitization of the agro-industrial complex, 3D printing, optimization, additive technologies, precision agriculture, parametric design, design automation, biotechnical structures.

Elena Mishchenko, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, art_lena@inbox.ru, Russia, Orel, Orel State Agrarian University

Dmitry Asonov, PhD student, asdmitrij@mail.ru, Russia, Orel, Orel State Agrarian University

УДК 631.171 : 681.518.3

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОЙ ОЦЕНКИ МАССЫ КОРОВ С ИСПОЛЬЗОВЫАНИЕМ ИНС

Немирович С. И. Гируцкий И.И.

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Аннотация: *В статье приведена методика получения экспериментальных данных дистанционного измерения массы коров черно-пестрой проды на молочнотоварной ферме. Предоставлен вариант расположения камер оптико-электронной системы для получения геометрических размеров животного и использование искусственных нейронных сетей для сегментации изображений заранее обученной модели DeepLab при выделении контура животного. Последовательность действия для определения геометрических размеров животного с изображения, используя значимые линии и расчет пиксельного размера с дальнейшим переводом в систему СИ для определения массы животного по зоотехнических таблицам, расчетам или уравнению регрессии. По результатам исследований при индивидуальном определении массы, абсолютная погрешность измерений составила до 38 кг, а относительная до 6%. Для группы животных абсолютная составил 2 кг, а относительная менее 0.04%.*

Ключевые слова: *масса, ИНС, крупно рогатый скот, параметры, геометрические размеры, взвешивание.*

Введение. Бесконтактная оценка массы коров с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) становится всё более актуальной в условиях современного животноводства. Эта технология позволяет значительно повысить скорость и точность определения веса животных без необходимости перемещения животных, так же не требует сложной модернизации уже построенных молочнотоварных ферм и полностью убирает физический контакт с животным у человека, что снижает стресс для животных и уменьшает трудозатраты и травмоопасность для персонала. Кроме того, автоматизация процесса способствует более точному мониторингу состояния стад и оптимизации кормовых рационов, что позитивно влияет на продуктивность и экономическую эффективность хозяйства.

Внедрение бесконтактной оценки массы позволяет ежесуточно контролировать массу животного, что в свою очередь позволяет своевременно выявлять возможные проблемы со здоровьем, такие как истощение или избыток веса, а также для оптимизации питания и кормления. Такой контроль позволяет своевременно корректировать уход, рацион и применение мед препаратов, обеспечивая более эффективное и гуманное ведение хозяйства.

Основная часть. Дистанционное измерение массы коров основывается на параметрических способах определения массы животных. Поэтому вначале необходимо определится какие параметры нам необходимо получить с изображения и где будет монтироваться камера для получения изображения. В зависимости какие камеры мы будем использовать, необходимо опытным путем найти лучшее расстояние для их расположения, обычно оно находится на расстоянии от 2 до 4 метров от объекта.[1] Способы размещения предоставлены на рисунке 1.

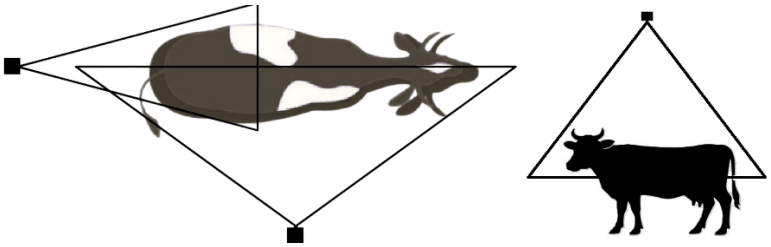


Рисунок 1 – Расположение камер для получения изображений используемых при получении геометрических размеров

Так же необходимо рассчитать погрешность камеры на получение геометрических размеров, расчеты по использованной нами камерой 13 МП, f/2.4 CMOS 1/3" с следующими параметрами:

− разрешение снимка: 4096x3072;

− размер матрицы 4.8x3.6 мм;

− диагональ кадра 6 мм;

− физический размер пикселя ширина 4096/4.8 = 0,001172 мм, длина 3072/3.6 = 0,001172 мм;

− фокусное расстояние f = 4 мм.

Проводились ранее и показали, что данная камера удовлетворяет требованиям и не вливает на погрешность измерений.[1]

Так же при выборе и использование камеры необходимо обратить внимание на такие параметры как тип объектива, кодирование изображения, форма и качество линзы.

Камера должна устанавливаться горизонтально животному и настроено фокусное расстояние на нем само животное должно располагаться в центре изображения. Расстояние от объектива камеры до животного необходимо замерять лазерным дальномером, рулеткой или другим способом. Расстояние до животного позволяет перевести размерность с пикселей в реальный размер животного. Также при отклонении животного от перпендикуляра камеры происходит уменьшение геометрических размеров, которые необходимо заранее предусмотреть или учесть в расчётах. Для оценки полученных результатов необходимо вручную замерять животное такие параметры как: длину, косую длину, и высоту туловища, обхват груди за лопатками. Также необходимо получить массу на стационарных весах.

Следующим этапом определения является определение контура на снимке мы использовали уже обученную модель для сегментации изображения DeepLab. Точное выделение контура позволяет определить форму, размеры и площадь животного, что является важными параметрами для дальнейших расчетов веса. Благодаря использованию расширенных сверток и модуля ASPP (Atrous Spatial Pyramid Pooling), DeepLab эффективно выделяет контур на разном расстоянии, что особенно ценно при обработке изображений с животными в разной позе и окружении. Выбранная нами модель обладает высокой точность определения границы и быстродействием, что позволяет оперативно определять параметры в автоматическом режиме. Определяет животное даже на сложных или размытых изображениях Полученные с помощью DeepLab маски позволяют точно определить геометрические размеры животного, что является ключевым для последующих расчетов его массы. Результаты предоставлены на рисунке 2 и рисунке 3.

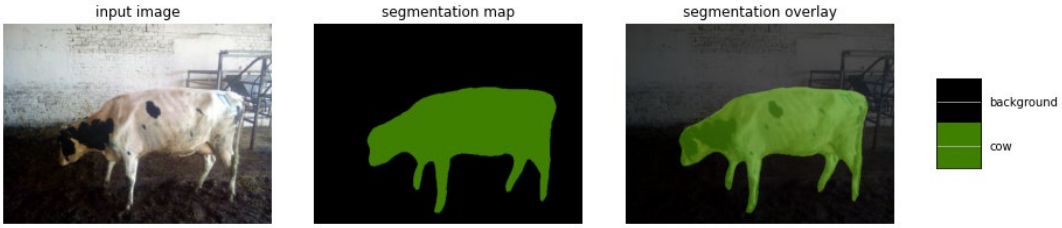


Рисунок 2 – Результат определения контура в ИНС вид с боку



Рисунок 3 - Результат определения контура в ИНС вид сзади

После получения маски животного находим значимые линии и высчитываем количество пикселей по необходимым параметром в примере, приведенном на рисунке 4 определялись длинна коровы и высота туловища.[2]

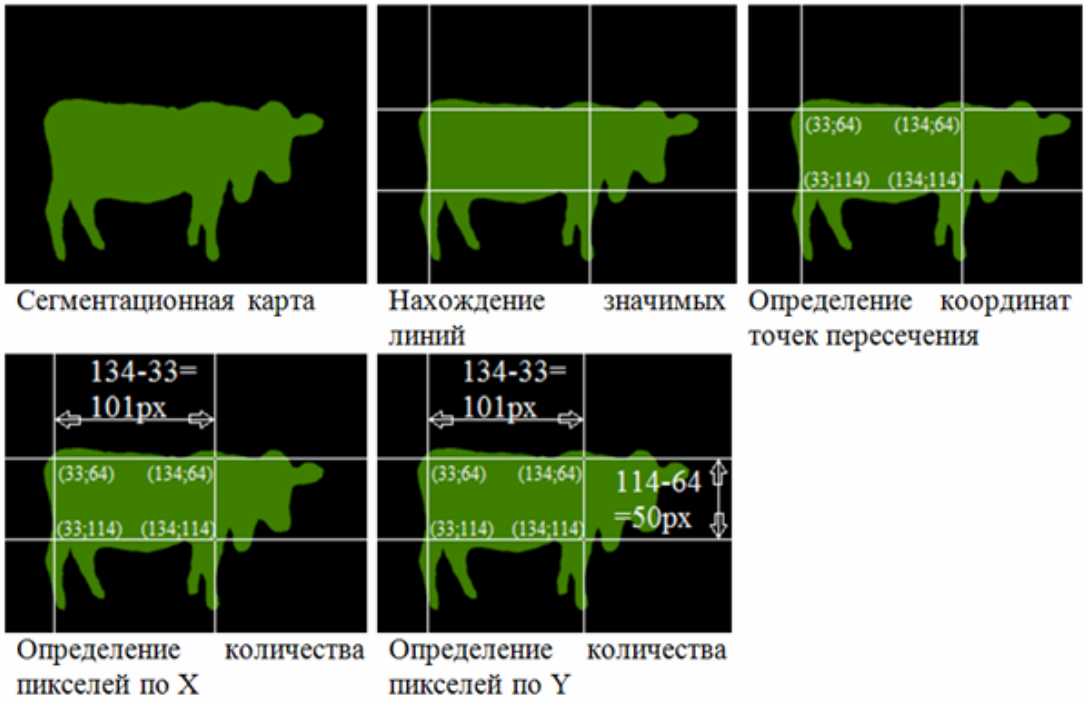


Рисунок 4 – Определение геометрических параметров в пикселях

На изображении размеры животного измеряются в пикселях — цифровых единиц, не имеющих прямой связи с реальными размерами. Чтобы определить реальный размер животного, необходимо преобразовать пиксели в сантиметры или метры. Для этого сначала устанавливают масштаб изображения, используя известный объект, находящийся рядом с животным и имеющий точно известную длину и ширину. Например, если рядом есть предмет, длина которого в реальности известна, и его длина на изображении составляет определённое количество пикселей, можно рассчитать коэффициент преобразования — сколько сантиметров или метров соответствует одному пикселю. Например, если 10

пикселей соответствуют 10 сантиметрам, то один пиксель равен 1 сантиметру. После определения этого коэффициента все измерения животного в пикселях умножают на него, получая реальные размеры (длина, ширина, косую длину туловища).

Второй вариант получения размерности пикселя заключается в взаимосвязи расстояния от камеры до животного, суть которого чем дальше находится животное от камеры тем больше становится пиксель, т.к. на одно и тоже расстояние уменьшится количество пикселей. Зависимость линейная и отличается для каждой камеры. Минусом данного способа является необходимость точного измерения расстояния до животного. Так же данный способ вводит дополнительную переменную, влияющую на точность измерения, которую необходимо учитывать при определении массы в будущих расчетах.

Ранее авторами уже была получено уравнение регрессии для приблизительной оценки массы животного.[3]

$$M = – 698{,}38 – 5{,}33 \cdot X1 + 12{,}63 \cdot X2 + 2{,}62 \cdot X3,$$

где M – масса;

X1 – длина коровы;

X2 – косая длина коровы;

X3 – высота коровы.

Полученные результаты для черно пестрой породы масса с отдельно стоящих стационарных весов и массу, полученную по методике дистанционного измерения массы оптико-электронной системы с использованием искусственного интеллекта, были сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение результатов, полученных с весов и методикой дистанционного определения массы черно пестрой породы коров [3]

Опыт	Масса, полученная по методике	Масса с стационарных весов	Разница
1	551	568	-17
2	593	613	-20
3	600	622	-22
4	640	602	38
5	606	614	-8
6	582	581	1
7	629	636	-7
8	623	629	-6
9	584	559	25
10	481	567	14
Суммарный вес	5889	5891	2

По данным видно, что результат по отдельным не удовлетворяет нормы по измерительным приборам для взвешивания КРС но хорошо подходит для взвешивания стада в целом. Для улучшения результат необходимо увеличивать количество параметров для измерения, ввести дополнительные возможности определения массы по зоотехническим промерам, к примеру метод Трухановского и метод Клювера-Штрауха используя размеры, полученные с дистанционного измерения.

Заключение. Данную методику определения массы можно использовать для группового взвешивания животных. Данный способ не вызывает стресса у животных и

уменьшает трудозатраты у персонала. Хорошо внедряется на построенные молочнотоварные фермы и позволяет ежесуточно контролировать массу животных.

Список используемых источников

1. Немирович С.И. Рекомендации к оптико-электронной системе для бесконтактной оценки массы КРС/ С.И. Немирович, И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков// Материалы 14-й МНПК «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии», Иркутский ГАУ, 24-25 апреля 2025.- с. 417-421.

2. Гируцкий И.И., Матвейчук Н.М., Немирович С.И. Использование искусственных нейронных сетей для определения геометрических размеров крупного рогатого скота / Гируцкий И. И., Матвейчук Н. М., Немирович С. И. // НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ – 2024. — Минск :БНТУ, 2024. — С. 16-18

3. Гируцкий, И. И. Использование искусственных нейронных сетей для обработки изображения в оптико-электронном методе определения массы крупного рогатого скота / И. И. Гируцкий, С. И. Немирович // Энергосбережение - важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 21-22 декабря 2021 г. - Минск: БГАТУ, 2021. - С. 266-268.

4.Ян Гудфеллоу, Иошуа Бенджио, Аарон Курвилль Глубокое обучение. - 2-е изд., испр изд. - Москва: ДМК Пресс, 2018. - 652 с.

5. Badrinarayanan V., Handa A., Cipolla R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Robust Semantic Pixel-Wise Labelling. – URL: https://arxiv.org/pdf/1511.00561.pdf. – 2015. Дата доступа:07.12.2025

6. Жилич Е.Л., Цалко С.А., Рогальская Ю.Н. Принцип работы системы определения промеров тела и живой массы сельскохозяйственных животных. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2025;1(58):30-37.

7. Ажмулдинов, Е.А. Влияние различных стресс-факторов на организм сельскохозяйственных животных / Е.А. Ажмулдинов, М.А Кизаев, М.Г. Титов // Животноводство и кормопроизводтсво. – 208. – . – Т. 101, № 2. – С. 254

Bibliography

1. Nemirovich S.I. Recommendations for an optical-electronic system for contactless measurement of cattle weight / S.I. Nemirovich, I.I. Girutsky, A.G. Senkov // Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference "Climate, Ecology, and Economy of Eurasia", Irkutsk State Agrarian University, April 24-25, 2025. - pp. 417-421.Pp. 16-18

2. Girutsky I.I., Matveychuk N.M., Nemirovich S.I. Using artificial neural networks to determine the geometric dimensions of cattle / Girutsky I.I., Matveychuk N.M., Nemirovich S.I. // NEW HORIZONS – 2024. - Minsk: BNTU, 2024. - P. 16-18

3. Girutsky, I. I. Using artificial neural networks for image processing in the optical-electronic method of determining the mass of cattle / I. I. Girutsky, S. I. Nemirovich // Energy saving is the most important condition for innovative development of the agro-industrial complex: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, December 21-22, 2021. - Minsk: BSATU, 2021. - P. 266-268.

4. Ian Goodfellow, Joshua Bengio, Aaron Courville Deep learning. - 2nd ed., revised ed. - Moscow: DMK Press, 2018. - 652 p.

5. Badrinarayanan V., Handa A., Cipolla R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Robust Semantic Pixel-Wise Labelling. – URL:

https://arxiv.org/pdf/1511.00561.pdf. – 2015. Дата доступа:07.12.2025

6. Zhilich E.L., Tsalko S.A., Rogalskay Yu.N. THE PRINCIPLE OF OPERATION OF THE SYSTEM FOR DETERMINING BODY MEASUREMENTS AND LIVE WEIGHT OF FARM ANIMALS. Mechanization and Electrification of Agriculture. 2025;1(58):30-37. (In Russ.)

7. Azhmuldinov, E.A. The Impact of Various Stress Factors on the Organism of Farm Animals / E.A. Azhmuldinov, M.A. Kizaev, M.G. Titov // Animal Husbandry and Forage Production. – 208. – . – V. 101, No. 2. – P. 254

Немирович Сергей Игоревич, ст. преподаватель, УО "Белорусский государственный аграрный технический университет" кафедра автоматизированных систем управления производством ул. Багратиона ул., дом 71 кв. 98, г. Минск, Республика Беларусь , 220037, тел. +37525 9012930, Nemirovich_S_I@mail.ru

Гируцкий Иван Иванович, д.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизированных систем управления производством УО "Белорусский государственный аграрный технический университет" ул. Ж. Алферова, дом 10 кв. 136, г. Минск, Республика Беларусь , 220065, тел. +375293087244, gir_50@mail.ru

A METHOD OF CONTACTLESS ASSESSMENT OF COW WEIGHT USING ANN

Nemirovich S. I., Girutskiy I. I.

Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

Annotation: The article presents a methodology for obtaining experimental data on remote measurement of the weight of black-and-white cows on a dairy farm. A variant of the arrangement of the cameras of the optical-electronic system for obtaining the geometric dimensions of the animal and the use of artificial neural networks for segmentation of images of a pre-trained DeepLab model when highlighting the contours of the animal are provided. A sequence of actions for determining the geometric dimensions of an animal from an image using significant lines and calculating the pixel size with subsequent conversion to the SI system to determine the animal's mass using zootechnical tables, calculations, or a regression equation. According to the results of studies on individual weight determination, the absolute measurement error was up to 38 kg, and the relative error was up to 6%. For a group of animals, the absolute error was 2 kg, and the relative error was less than 0.04%.

Keywords: mass, INS, cattle, parameters, geometric dimensions, weighing.

Nemirovich Sergey Igorevich, senior teacher, EI "Belarusian State Agrarian Technical University" Department of Automated Production Management Systems, Bagration str., 71 sq. 98, Minsk, Republic of Belarus, 220037, tel. +37525 9012930, Nemirovich_S_I@mail.ru

Girutskiy Ivan Ivanovich, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automated Production Control Systems, Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Zh. Alferov St., Building 10, Apt. 136, Minsk, Republic of Belarus, 220065, Tel.: +375293087244, gir_50@mail.ru

УДК 631.3

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ УХОДА ЗА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ РАСТЕНИЯМИ

В.В. Васильев[1], Д.Н. Афоничев[1], И.И. Аксенов[1]

[1]ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

Аннотация. *Рассмотрен усовершенствованный беспилотный летательный аппарат сельскохозяйственного назначения, предназначенный для ухода за сельскохозяйственными растениями. Главной особенностью данного беспилотного летательного аппарата является то, что электроприводы соединены с валами, установленными в подшипниковых узлах и имеющими свободные концы, вынесенные на равные расстояния от боковой поверхности корпуса. На свободных концах валов установлены катушки, за которые закреплены гибкие рукава, причем по бокам гибких рукавов на равном удалении друг от друга установлены соединительные штуцеры, а распределительные трубки спирально навиты на валы и проложены в гибких рукавах. Практическое применение рассмотренного беспилотного летательного аппарата позволит уменьшить расход материальных ресурсов на выполнение комплекса работ по уходу за растениями авиационным способом.*

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, катушка, гибкий рукав, вал, штуцер, форсунка, уход, обработка, рабочий раствор.*

Введение. Уход за сельскохозяйственными растениями является одним из важных мероприятий, направленным на получение высокого и качественного урожая. В настоящее время, как правило, уход за сельскохозяйственными растениями осуществляется наземными техническими средствами, в виде самоходных или прицепных опрыскивателей [1, 2, 3, 4]. При использовании самоходных или прицепных опрыскивателей для ухода за деревьями и кустарниками в промышленных садах, а также при уходе за такими высокорослыми сельскохозяйственными культурами как подсолнечник, кукуруза и т.д., применение наземных технических средств не эффективно по ряду причин. Главными причинами являются низкое качество обработки растений и высокий расход рабочего раствора. В настоящее время единственным решением устранения данных недостатков в рамках цифровизации сельского хозяйства является применение авиационного способа ухода за растениями, для чего рекомендуется использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [4, 5, 6, 7, 8, 9].

Цель работы – усовершенствовать БПЛА сельскохозяйственного назначения для повышения эффективности обработки сельскохозяйственных растений.

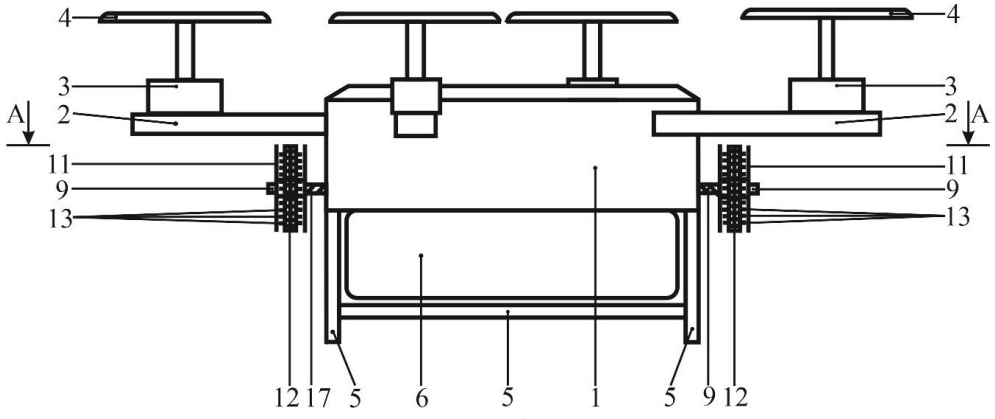
Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели работы выполнен анализ известных БПЛА сельскохозяйственного назначения [7, 8, 9, 10], предназначенных для ухода за сельскохозяйственными растениями. Анализ данных БПЛА показал, что они имеют сложную конструкцию и низкую эффективность обработки сельскохозяйственных растений. Эти недостатки формируют высокую стоимость изготовления БПЛА и высокие затраты на обработку посевов и древесных насаждений.

Результаты и обсуждение. Взяв за прототип БПЛА [10], разработанный в Китае, авторы усовершенствовали его. Усовершенствованный БПЛА представлен на рисунках 1 и 2.

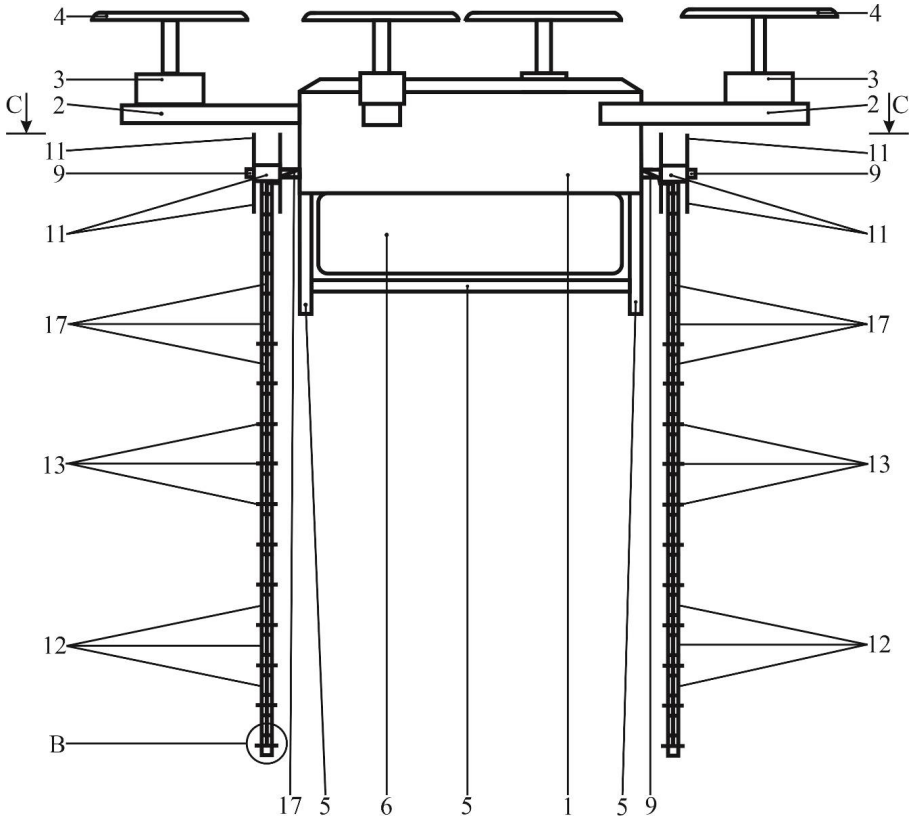
БПЛА сельскохозяйственного назначения [11] включает корпус *1*, по бокам которого жестко закреплены четыре горизонтальные штанги *2*. На свободном конце каждой горизонтальной штанги *2* сверху установлен двигатель *3* с лопастями воздушного винта *4*. Нижняя часть корпуса *1* оснащена шасси *5*, где между корпусом *1* и шасси *5* установлена емкость *6* для рабочего раствора. Внутри корпуса *1* закреплены насос высокого давления *7* и электроприводы *8*, каждый из которых соединен с валом *9*, установленным в подшипниках узлах *10*. Свободные концы валов *9* вынесены на равные расстояния от боковой поверхности корпуса *1*. На свободных концах валов *9* установлены катушки *11*, где за катушки *11* закреплены гибкие рукава *12*. По бокам гибких рукавов *12* на равном удалении друг от друга установлены соединительные штуцеры *13*, оснащенные регулирующими органами *14*, а на свободном конце каждого штуцера *13* закреплена форсунка *15*. Насос высокого давления *7* соединен с емкостью *6* подающей трубкой *16*, а со штуцерами *13* – распределительными трубками *17*, которые спирально навиты на валы *9* и проложены в гибких рукавах *12*.

БПЛА сельскохозяйственного назначения работает следующим образом. В емкость *6* заливается рабочий раствор, посредством регулирующих органов *14* устанавливается норма расхода рабочего раствора через форсунки *15*. Оператор сигналами с пульта управления запускает БПЛА и направляет его в зону обработки.

При обработке посевов сельскохозяйственных культур и крон деревьев сверху оператор с пульта управления подает сигнал на включение электроприводов *8*, которые передают крутящий момент на валы *9* [11]. В результате этого, при вращении валов *9* с катушками *11* гибкие рукава *12* выводятся из транспортного положения и опускаются между рядами растений на заданную длину, где форсунки *15* устанавливаются напротив обрабатываемых растений. Затем оператор с пульта управления подает сигнал на включение насоса высокого давления *7*, который начинает подавать рабочий раствор из емкости *6* по распределительным трубкам *17* к соединительным штуцерам *13*, происходит распыление рабочего раствора через форсунки *15*. Израсходовав рабочий раствор в емкости *6*, оператор с пульта управления подает сигнал на отключение насоса высокого давления *7*. Одновременно с этим оператор подает сигнал на реверсирование электроприводов *8*. В результате чего, при вращении валов *9* с катушками *11* гибкие рукава *12* наматываются на катушки *11*. Затем оператор сигналами с пульта управления отключает электроприводы *8* и направляет БПЛА к месту заправки и обслуживания.



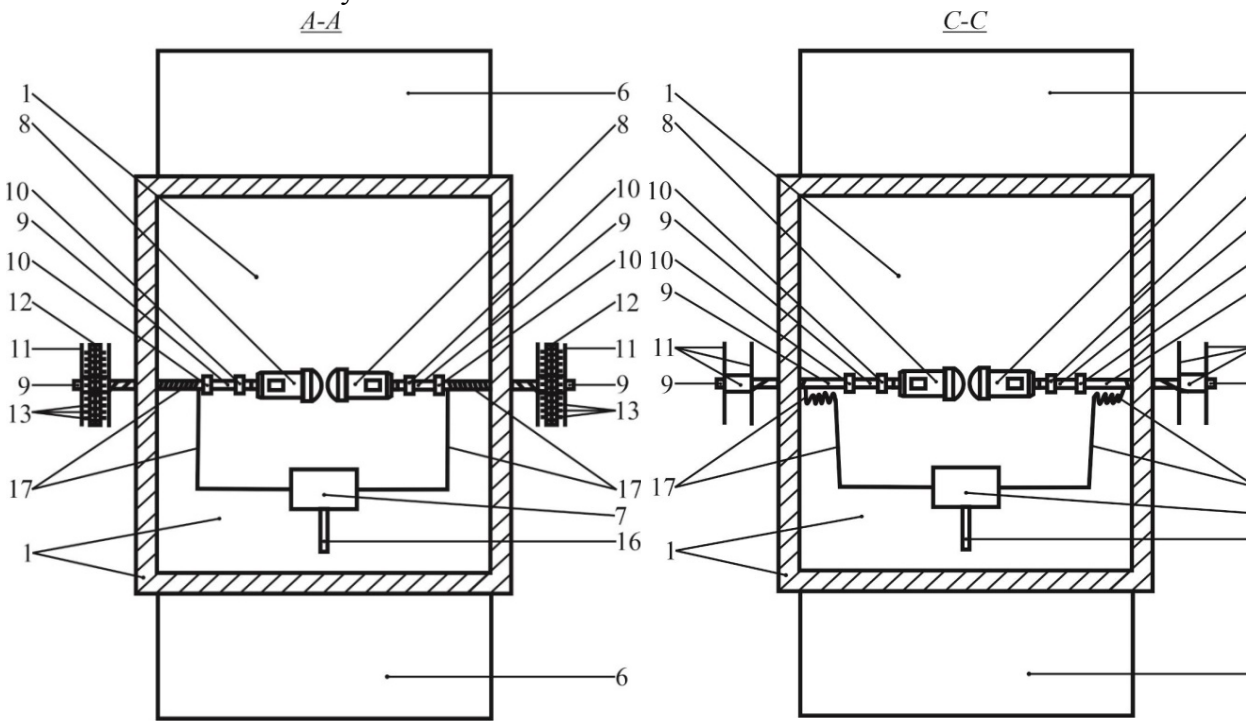
а)



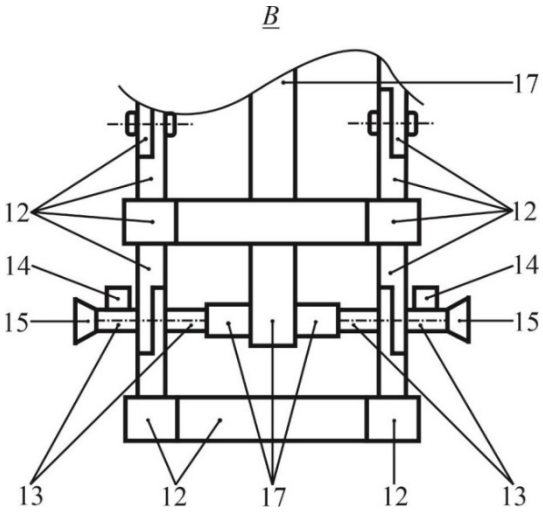
б)

а – вид спереди в транспортном положении; б – вид спереди в рабочем положении

Рисунок 1 – БПЛА сельскохозяйственного назначения



а) б)



в)

а – разрез А–А на рисунке 1а; б – разрез С–С на рисунке 1б; в – узел В на рисунке 1б

Рисунок 2 – БПЛА сельскохозяйственного назначения

В случае обработки деревьев внутри кроны, оператор с пульта управления подает сигнал на электроприводы *8* [11]. В результате этого, при вращении валов *9* с катушками *11* гибкие рукава *12* выводятся из транспортного положения и опускаются между ветвями деревьев на заданную длину, где форсунки *15* устанавливаются напротив обрабатываемых ветвей деревьев. Затем оператор с пульта управления подает сигнал на включение насоса высокого давления *7*, который начинает подавать рабочий раствор из емкости *6* по распределительным трубкам *17* к соединительным штуцерам *13*, происходит распыление рабочего раствора через форсунки *15*. Израсходовав рабочий раствор в емкости *6*, оператор с пульта управления подает сигнал на отключение насоса высокого давления *7*. Одновременно с этим оператор подает сигнал на реверсирование электроприводов *8*. В результате этого, при вращении валов *9* с катушками *11* гибкие рукава *12* наматываются на катушки *11*. Оператор сигналами с пульта управления отключает электроприводы *8* и направляет БПЛА к месту заправки и обслуживания.

Вывод. Использование усовершенствованного БПЛА сельскохозяйственного назначения позволит снизить затраты на уход за посевами сельскохозяйственных культур и древесными насаждениями авиационным способом за счет упрощения конструкции БПЛА сельскохозяйственного назначения и снижения расхода рабочего раствора. При этом высокое качество обработки сельскохозяйственных растений данным БПЛА позволит повысить урожайность.

Список использованных источников

1. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Исследование параметров постоянной технологической колеи, предназначенной для ухода за посевами сельскохозяйственных культур в Центральном Черноземье // Наука в Центральной России. 2024. № 4(70). С. 51–65. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-51-65.

2. Интенсивные технологии возделывания зерновых и технических культур / Под. ред. А.И. Зинченко, И.М. Карасюка. К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. 327 с.

3. Шаганов И.А. Практические рекомендации по освоению интенсивной технологии возделывания озимых зерновых культур: 2-е изд., доп. и перераб. // Минск: Равноденствие, 2008. 180 с.

4. Афоничев Д.Н., Васильев В.В. Обоснование целесообразности использования беспилотных летательных аппаратов для ухода за посевами сельскохозяйственных культур // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 2(85). С. 94–100. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_94.

5. Васильев В.В., Афоничев Д.Н., Аксенов И.И. Усовершенствованный беспилотный летательный аппарат для защиты промышленных садов // Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве: сборник научных докладов международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию ФГБНУ ВНИИТиН; г. Тамбов, 1-2 октября 2025 года. Тамбов: ФГБНУ ВИНИИТиН. С. 224–227.

6. Афоничев Д.Н., Васильев В.В. Усовершенствованный беспилотный летательный аппарат сельскохозяйственного назначения с точечным внесением рабочего раствора на растения // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы международной научно-практической конференции; Россия, г. Воронеж, 31 октября 2025 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. С. 131–136.

7. Krishna K.R. Agricultural drones: a peaceful pursuit // Oakville: Apple Academic Press; CRC Press, 2018. 394 p.

8. Mohanty S.N., Ravindra J.V.R., Narayana G.S. Drone technology: future trends and practical applications. USA: Wiley-Scrivener, 2023. 467 p.

9. Sundaravadivazhagan B., Natarajan G., Chelliah P.R. Intelligent robots and drones for precision agriculture // Springer, 2024. 490 p.

10. Patent 221757724 U (CN), Int. Cl. A 01 M 7/00; B 64 D 1/18; 10/14; 101/40; 101/45. Unmanned aerial vehicle pesticide spraying device for disease and pest control / Y. Zhang; D. Zang; Y. Gong (CN). Patent holder JINING YANZHOU AGRICULTURAL TECH PROMOTION CENTER (CN). № 202420010204.2; filed: 03.01.2024; date application 24.09.2024. 11 p.

11. Патент № 2847607 РФ, МПК B 64 U 10/14; B 64 C 39/02. Беспилотный летательный аппарат сельскохозяйственного назначения / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев, И.И. Аксенов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2025110687; заявл. 24.04.2025; опубл. 09.10.2025, бюл. № 28. 11 с.

Bibliography

1. Vasilyev V.V., Afonichev D.N. Research of the Parameters of a Permanent Technological Track Designed for Crop Care in the Central Chernozem Region // Science in Central Russia. 2024. No. 4(70). Pp. 51–65. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-51-65.

2. Intensive Technologies of Cultivation of Cereals and Industrial Crops / Ed. by A.I. Zinchenko and I.M. Karasyuk. K.: Vyshcha Shkola, 1988. 327 p.

3. Shaganov I.A. Practical recommendations for mastering intensive technology of winter grain crops cultivation: 2nd ed., add. and revised. // Minsk: Ravnodenstvie, 2008. 180 p.

4. Afonichev D.N., Vasilyev V.V. Justification of the Usefulness of Unmanned Aerial Vehicles for Crop Care // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2025. Vol. 18, No. 2(85). Pp. 94–100. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_94.

5. Vasilyev V.V., Afonichev D.N., Aksenov I.I. Improved Unmanned Aerial Vehicle for Protecting Industrial Orchards // New Technologies in the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture: Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 45th Anniversary of the All-Russian Research Institute of Agricultural Engineering and Nutrition; Tambov, October 1-2, 2025. Tambov: All-Russian Research Institute of Agricultural Engineering and Nutrition. Pp. 224-227.

6. Afonichev D.N., Vasilyev V.V. Improved Unmanned Aerial Vehicle for Agricultural Purposes with Spot Application of Working Solution to Plants // Science and Education at the Present Stage of Development: Experience, Problems, and Solutions for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; Russia, Voronezh, October 31, 2025. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2025. Pp. 131–136.

7. Krishna K.R. Agricultural drones: a peaceful pursuit // Oakville: Apple Academic Press; CRC Press, 2018. 394 p.

8. Mohanty S.N., Ravindra J.V.R., Narayana G.S. Drone technology: future trends and practical applications. USA: Wiley-Scrivener, 2023. 467 p.

9. Sundaravadivazhagan B., Natarajan G., Chelliah P.R. Intelligent robots and drones for precision agriculture // Springer, 2024. 490 p.

10. Patent 221757724 U (CN), Int. Cl. A 01 M 7/00; B 64 D 1/18; 10/14; 101/40; 101/45. Unmanned aerial vehicle pesticide spraying device for disease and pest control / Y. Zhang; D. Zang; Y. Gong (CN). Patent holder JINING YANZHOU AGRICULTURAL TECH PROMOTION CENTER (CN). № 202420010204.2; filed: 03.01.2024; date application 24.09.2024. 11 p.

11. Patent No. 2847607 of the Russian Federation, IPC B 64 U 10/14; B 64 C 39/02. Unmanned Aerial Vehicle for Agricultural Purposes / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev, I.I. Aksenov; applicant and patent holder: Voronezh State Agrarian University. No. 2025110687; filed on April 24, 2025; published on October 9, 2025, Bulletin No. 28. 11 p.

Владимир Викторович Васильев, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ,
394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1, e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru
Дмитрий Николаевич Афоничев, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ,
394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1, e-mail: dmafonichev@yandex.ru
Игорь Игоревич Аксенов, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ,
394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1, e-mail: igor-aksenov1989@ya.ru

UNMANNED FLYING APPARATUS FOR FARMING PLANT CARE

V.V. Vasiliev[1], D.N. Afonichev[1], I.I. Aksenov[1]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Abstract. An improved agricultural unmanned aerial vehicle designed for agricultural plant care is considered. The main feature of this unmanned aerial vehicle is that the electric drives are connected to shafts installed in bearing units and having free ends that are spaced equally from the side surface of the body. On the free ends of the shafts, there are coils, to which flexible sleeves are attached, and connecting fittings are installed on the sides of the flexible sleeves at equal distances from each other, and the distribution tubes are spirally wound on the shafts and laid in the flexible sleeves. The practical application of the considered unmanned aerial vehicle will reduce the

consumption of material resources for performing a set of works on plant care by the aviation method.

Key words: unmanned aerial vehicle, reel, flexible hose, shaft, fitting, nozzle, maintenance, processing, working solution.

Vladimir Viktorovich Vasiliev, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State
Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
394087, Voronezh, Michurina Street, 1, e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru
Dmitry Nikolaevich Afonichev, Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Electrical Engineering and Automation,
Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
394087, Voronezh, Michurina Street, 1, e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru
Igor Igorevich Aksenov, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State
Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
394087, Voronezh, Michurina Street, 1, e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru

УДК.633.521

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СЕМЯН ЛЬНА-ДОЛГУНЦА В СЕМЯПРОВОДЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Фирсов А.С., Клюева К.Ю.

ФГБОУ ВО «Тверская ГСХА»

Аннотация: *В работе представлена математическая модель движения семян льна-долгунца в семяпроводе, основанная на нечёткой логике и учитывающая стохастичность ключевых факторов посева. Модель позволяет повысить точность дозирования и равномерность распределения семян за счёт использования лингвистических переменных и нечётких правил вывода. В её основе — формализация неопределённостей, присущих реальному процессу: колебаний влажности, неоднородности размеров семян, вариаций скорости воздушного потока. С помощью нечёткой базы знаний описываются взаимосвязи между входными параметрами (диаметр семяпровода, угол наклона, расход воздуха) и выходными показателями (плотность потока, равномерность высева). Модель включает блок фаззификации, механизм нечёткого вывода и дефаззификацию результатов, что обеспечивает адаптивность к изменяющимся условиям. Практическая реализация способствует оптимизации посевных операций и росту урожайности.*

Ключевые слова: *лен-долгунец, математическая модель, высев, нечеткая логика, фазификация.*

Введение.

Посев льна-долгунца — технологически сложный процесс, требующий высокой точности дозирования и равномерности распределения семян [7]. Специфика культуры обусловливает ряд принципиальных ограничений:

1) мелкий размер семян (масса 1000 шт. — 3–7 г) повышает риск их травмирования при механическом воздействии;

2) высокая требовательность к равномерности высева — неравномерное распределение приводит к конкуренции растений за свет и питательные вещества, снижая выход волокна и семян;

3) чувствительность к глубине заделки — отклонение даже на 0,5–1 см критично для всхожести из-за слабого начального роста проростка;

4) зависимость от влажности семян — при повышенной влажности возрастает адгезия к рабочим поверхностям, провоцируя забивание семяпроводов.

Эти особенности делают традиционные детерминированные модели посева недостаточно эффективными: они не учитывают стохастичность факторов (колебания воздушного потока, неоднородность семенного материала), что ведёт к:

- потерям семян из-за забивания семяпроводов;
- неравномерности распределения по площади;
- снижению полевой всхожести на 15–25 %.

Цель исследования — разработать математическую модель движения семян льна-долгунца в семяпроводе на основе нечёткой логики, обеспечивающую повышение

точности дозирования и распределения за счёт учёта нечёткости входных параметров.

Разработанная модель может быть использована производителями посевной техники, агрохолдингами и научно-исследовательскими организациями при проектировании и настройке высевающих систем для льна-долгунца и других мелкосемянных культур.

Основная часть.

Посев льна-долгунца предъявляет жёсткие требования к технологическому процессу ввиду специфических биологических и физико-механических характеристик семян. Семена льна отличаются малым размером (3–5 мм в длину и 1,5–2,5 мм в ширину) и небольшой массой (3–7 г на 1 000 штук), что существенно осложняет их дозирование и повышает риск механического травмирования. Форма семян — овально-яйцевидная с заострённым концом — обусловливает анизотропию трения и склонность к заклиниванию в узких каналах семяпроводов. Важную роль играет коэффициент трения, который напрямую зависит от влажности: у сухих семян он составляет 0,25–0,35, а при увлажнении возрастает до 0,4–0,55 из-за усиления адгезии к металлическим и полимерным поверхностям. Кроме того, оболочка семян относительно хрупкая, а сами они обладают высокой гигроскопичностью — активно поглощают влагу из воздуха, что в процессе хранения и высева меняет их массу, объём и фрикционные свойства [6].

Технология посева требует строгого соблюдения ряда параметров для обеспечения высокой полевой всхожести и равномерного стеблестоя. Глубина заделки должна находиться в диапазоне 1,5–2,5 см: отклонение более чем на ±0,5 см критично — при заглублении прорастание замедляется и проростки ослабевают, а при недостаточной глубине семя может пересохнуть и зародыш погибнет [5]. Норма высева составляет 5–6 млн всхожих семян на гектар (50–100 кг/га) с точностью дозирования не ниже ±5 % от заданной нормы [9]. Равномерность распределения также жёстко регламентирована: по площади коэффициент вариации межсеменного расстояния не должен превышать 15 %, а по рядкам отклонение от заданной ширины междурядий допускается в пределах ±1 см. Скорость посева ограничена значением 8–10 км/ч — превышение этого порога ведёт к неравномерному распределению и травмированию семян. Наконец, состояние почвы должно обеспечивать мелкокомковатую структуру (диаметр агрегатов 1–5 мм) и плотность 1,1–1,3 г/см³ [7].

Классические математические модели движения семян в семяпроводах, базирующиеся на механике сплошных сред, дифференциальных уравнениях и регрессионном анализе, демонстрируют ряд принципиальных ограничений, снижающих их применимость для посева льна-долгунца. Прежде всего, они не учитывают вариабельность влажности семян, которая в реальных условиях может изменяться от 10 % до 11% [8]. Это напрямую влияет на коэффициент трения (рост на 30–50 % при увлажнении), аэродинамическое сопротивление (увеличение массы снижает скорость в воздушном потоке) и склонность к слипанию и забиванию, однако модели используют фиксированные значения параметров, что порождает ошибки в прогнозировании.

Ещё одно существенное ограничение — игнорирование колебаний воздушного потока в пневмосистемах. Давление и скорость воздуха варьируются из-за пульсации вентилятора, изменения длины и конфигурации трубопроводов, локальных сужений или расширений. В реальности поток турбулентен, а скорость семян колеблется на 10–20 %, однако детерминированные модели предполагают стационарные условия, что приводит к неравномерности подачи и «провалам» в высеве.

Кроме того, классические модели не адаптируются к изменениям рельефа поля. На

склонах угол наклона семяпровода меняется от –5° до +10°, что влияет на силу тяжести, действующую вдоль оси, и вероятность застревания семян в изгибах. Поскольку модели не предусматривают динамической корректировки параметров в зависимости от пространственного положения машины, возникают локальные перегущения или пропуски высева [4].

Также детерминированные подходы не учитывают неоднородность семенного материала: в партии присутствуют семена разного размера, формы и массы, что ведёт к сепарации по размерам в пневмосистеме и неравномерному распределению в рядке. При этом расчёты ведутся «в статике», без обратной связи с реальными условиями посева (влажность, давление, наклон) и без механизма адаптации к нештатным ситуациям (например, частичному забиванию семяпровода).

Разработаем модель, исходя из фиксированных значений входных лингвистических переменных, для начала стоит представить структурную схему нечеткого вывода представленного на рисунке 1.

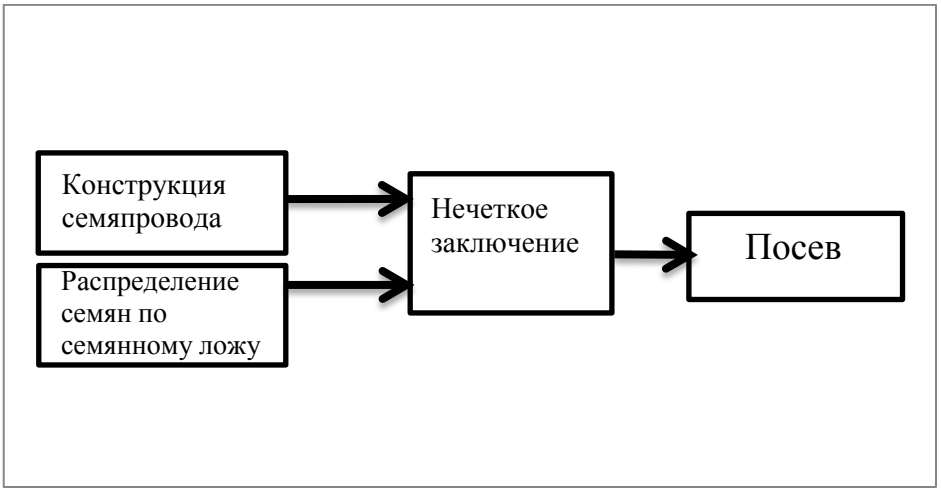


Рисунок 1 - Структурная схема нечеткого вывода

Далее определены основные параметры для создания математической модели

1) влажность семян — умеренная (9–12 %);
2) скорость воздушного потока — оптимальная (6–8 м/с);
3) плотность посева — нормативная (30–50 тыс. семян/м²);
4) шероховатость семяпровода — средняя (1–2 мкм).

На первом этапе сформируем базу нечётких правил, отражающую взаимосвязи между входными параметрами и выходными показателями. Правила строятся по схеме «ЕСЛИ <условие 1> И <условие 2> ТО <вывод>» с использованием логического оператора И (min) для агрегирования условий [2]. Для заданных входных значений актуальны следующие правила, которые представлены в виде системы:

$$\begin{cases} (W = \text{ум}) \wedge (V = \text{опт}) \rightarrow S = \text{стаб} \\ (D = \text{норм}) \wedge (R = \text{ср}) \rightarrow U = \text{выс} \\ (V = \text{опт}) \wedge (D = \text{норм}) \rightarrow \text{Р} = \text{низ}, \\ (W = \text{ум}) \wedge (R = \text{ср}) \rightarrow \text{В} = \text{низ} \\ (V = \text{опт}) \wedge (W = \text{ум}) \rightarrow T = \text{мин} \end{cases} \quad (1)$$

Далее представлена расшифровка обозначений:

W — влажность семян, %;

V — скорость воздушного потока, м/с;

S — скорость движения семени, м/с;

D — плотность посева (количество семян, размещённых на единице площади), шт/м^2;

R — шероховатость семяпровода, мкм;

U — равномерность высева, %;

P — вероятность пропусков, %;

B — риск забивания, %;

T — травмирование семян, %.

Поскольку входные значения точно соответствуют диапазонам заданных термов, все пять правил активны со степенью истинности 1,0.

Перейдём к механизму нечёткого вывода. На этапе фаззификации определяем степень принадлежности входных параметров к нечётким термам. Для всех переменных она равна 1,0 (точное попадание в центр лунки) [1]. Далее выполняем агрегирование условий в каждом правиле через оператор min:

для Правила 1: min(1,0; 1,0)=1,0;

для Правила 2: min(1,0; 1,0)=1,0;

для Правила 3: min(1,0; 1,0)=1,0;

для Правила 4: min(1,0; 1,0)=1,0;

для Правила 5: min(1,0; 1,0)=1,0.

На этапе композиции нечётких множеств объединяем выводы всех правил через оператор max для каждого выходного параметра:

скорость движения семени: стабильная=1,0;

равномерность высева: высокая=1,0;

вероятность пропусков: низкая=1,0;

риск забивания: низкий=1,0;

травмирование семян: минимальное=1,0.

Дефаззификация — заключительный этап нечёткого логического вывода, в ходе которого нечёткие лингвистические оценки преобразуются в конкретные числовые значения, пригодные для практического применения [3]. Выбор метода дефаззификации зависит от типа выходной переменной:

- для непрерывных параметров (скорость, процентные доли) применяется метод центра тяжести;
- для дискретных категорий (уровни риска, качественные оценки) используется метод максимума.

Рассмотрим применение этих методов к каждому из выходных параметров.

1. Скорость движения семени Диапазон нечёткого множества: 0,8–1,2 м/с (лингвистическая оценка «стабильная»).

$$v = \frac{\int_{0.8}^{1.2} v*u(v)dv}{\int_{0.8}^{1.2} u(v)dv} \approx 1{,}0 \text{ м/с}, \qquad (2)$$

где $\mu(v)$ — функция принадлежности нечёткого множества «стабильная».

После вычисления интегралов (с учётом формы функции принадлежности) получаем:

$$v \approx 1{,}0 \text{ м/с}$$

Прогнозируемая скорость движения семени составляет 1,0 м/с, что соответствует лингвистической оценке «стабильная».

Далее рассмотрим вероятность равномерного высева (непрерывный параметр). Диапазон нечёткого множества: 85–95%. Предполагая симметричную функцию принадлежности, центр тяжести совпадает с серединой диапазона:

$$P_{равн} = \frac{85+95}{2} = 90\%, \quad (3)$$

Вероятность равномерного высева оценивается в 90%.

Также стоит рассмотреть риск забивания.

Значения, которые применяются на данном этапе: «низкий», «средний», «высокий».

Входные данные:

- Степень принадлежности к «низкий»: μнизкий=1,0;
- Степени принадлежности к «средний» и «высокий»: <1,0.

Поскольку μнизкий достигает максимума (1,0), выбирается категория «низкий». Риск забивания семяпровода признается «низкий».

Далее травмирование семян. Диапазон нечёткого множества: 1–3%. Для симметричной функции принадлежности центр тяжести — середина диапазона:

$$T = \frac{1+3}{2} = 2\%, \quad (4)$$

Уровень травмирования семян составляет 2%, что признается оценке «минимальное».

На основе дефаззификации получены следующие чёткие значения:

1. Скорость движения семени: 1,0 м/с («стабильная»);
2. Вероятность равномерного высева: 90% («высокая»);
3. Риск забивания семяпровода: «низкий»;
4. Травмирование семян: 2% («минимальное»);

Таким образом, модель прогнозирует оптимальный режим высева льна-долгунца при заданных условиях. Высокая равномерность распределения, минимальный риск забивания и травмирования подтверждают корректность выбранных параметров сеялки. Это позволяет рекомендовать указанные настройки (умеренная вар, оптимальная скорость потока, нормативная плотность посева, средняя шероховатость семяпровода) как базовые для практического применения.

Заключение

В ходе исследования разработана математическая модель посева льна-долгунца на основе нечёткой логики, решающая проблему низкой эффективности традиционных детерминированных подходов, которые не учитывают стохастичность ключевых факторов, что приводит к забиванию семяпроводов, неравномерному распределению семян и снижению всхожести на 15–25 %. Модель интегрирует лингвистические переменные и функции принадлежности для учёта нечёткости входных параметров, описывает динамику движения семени через дифференциальное уравнение второго закона Ньютона с нечёткими коэффициентами трения и аэродинамического сопротивления, формирует базу правил типа «ЕСЛИ … И … ТО …» для прогнозирования скорости движения, равномерности высева, риска забивания и травмирования семян, а также применяет механизмы нечёткого вывода и дефаззификацию.

Список использованных источников:

1. Аверкин А.Н. Нечеткое отношение моделирования и его использование для классификации и аппроксимации в нечетких лингвистических пространствах.- Изв. АН СССР:Техническая кибернетика, 1982, N 2, с. 215.

2. Аверкин А.Н., Нгуен Х. Использование нечеткого отношения моделирования для экспертных систем. - М.: ВЦ АН СССР, 1988. - 24 с.

3. Агросервер / Официальный сайт. [Электронный ресурс] //URL: https://agroserver.ru/ (дата обращения: 23.11.2025)

4. Голубев, В. В. Уравнение движения мелкосеменных культур в дисковом пневматическом высевающем аппарате / В. В. Голубев, А. С. Фирсов // Агротехника и энергообеспечение. — 2014. — № 1 (1). — С 73–78.

5. ГОСТ Р 52784-2007. Лён-долгунец. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — М. : Стандартинформ, 2008. — IV, 6 с.

6. Завражнов Ю. А., Завражнов А. И. Совершенствование технологий возделывания льна-долгунца. // Вестник Мичуринского ГАУ. — 2018. — № 3. — С. 82–87.

7. Коринец В. В., Савенкова Е. В. Оптимизация параметров посева льна-долгунца. // Агроинженерия. — 2021. — № 4 (104). — С. 45–51.

8. Льноводство: монография / под редакцией А. Р. Рогаша. — М.: Колос, 1967. — 583 с.: ил., [1] л. схем.

9. Романовский Н. К., Иванов А. В. Моделирование движения сыпучих материалов в сельскохозяйственных машинах. // Сельскохозяйственные машины и технологии. — 2020. — Т. 14, № 2. — С. 34–40.

Фирсов А.С. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Тверская ГСХА» , sevenrom777@yandex.ru
Клюева К.Ю. – соискатель кафедры ТТМиК, преподаватель,
ФГБОУ ВО «Тверская ГСХА», carina.2h@yandex.ru

MATHEMATICAL MODEL OF THE MOVEMENT OF FLAX SEEDS IN THE SEED CHANNEL BASED ON THE USE OF FUZZY LOGIC

Firsov A.S. – PhD, Associate Professor, Tver State Agricultural Academy, sevenrom777@yandex.ru
Klyueva K.Yu. – Applicant of the Department of TTM and K, Lecturer, Tver State Agricultural Academy, carina.2h@yandex.ru

Abstract: The paper presents a mathematical model of the movement of flax seeds in the seed line, based on fuzzy logic and taking into account the stochastic nature of key sowing factors. The model allows for improved dosing accuracy and uniform seed distribution by using linguistic variables and fuzzy inference rules. It is based on the formalization of uncertainties inherent in the real process, such as fluctuations in moisture content, variations in seed size, and changes in air flow velocity. Using a fuzzy knowledge base, the relationships between input parameters (seed tube diameter, angle of inclination, and air flow rate) and output indicators (flow density and uniformity of seeding) are described. The model includes a fuzzyification block, a fuzzy inference mechanism, and a fuzzyification of the results, which ensures adaptability to changing conditions. The practical implementation contributes to the optimization of sowing operations and the increase in crop yields.

Keywords: flax, mathematical model, sowing, fuzzy logic, and phase-based modeling.

Firsov A.S. – PhD, Associate Professor, Tver State Agricultural Academy, sevenrom777@yandex.ru
Klyueva K.Yu. – Applicant of the Department of TTM and K, Lecturer, Tver State Agricultural Academy, carina.2h@yandex.ru

УДК 53.082.4

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА «ВИБРОМЕТР» ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Р.А. Булавинцев, А.С. Комоликов, А.В. Волженцев, А.М. Полохин, И.Е. Пупавцев

ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

***Аннотация**: В статье рассматривается проблема вибрационных нагрузок как ключевого фактора износа и снижения надежности сельскохозяйственной техники. Описывается применение программно-аппаратного комплекса «Виброметр» (Zetlab) для измерения и анализа параметров вибрации (виброскорости, виброперемещения, виброускорения) в реальных условиях эксплуатации. Рассмотрены принципы работы комплекса, включая сбор данных с помощью акселерометров, обработку сигналов и визуализацию результатов. Показано, что использование «Виброметра» позволяет перейти к предиктивному обслуживанию, повысить готовность техники, сократить затраты на ремонты и обеспечить соответствие условий труда требованиям вибрационной безопасности.*

***Ключевые слова:** виброметр, сельскохозяйственная техника, вибродиагностика, виброскорость, виброперемещение, виброускорение, мониторинг состояния, акселерометр, безопасность труда.*

Введение. Эксплуатация сельскохозяйственной техники связана с постоянным воздействием значительных динамических нагрузок, возникающих при работе двигателя, трансмиссии, ходовой системы и рабочих органов. Результирующая вибрация является ключевым фактором, ускоряющим усталостное разрушение металла, ослабление резьбовых соединений и выход из строя критических узлов, что ведет к росту затрат на ремонт и простоям в периоды уборочной кампании [1]. Традиционные методы диагностики, основанные на субъективной оценке или визуальном осмотре, часто не позволяют выявить зарождающиеся дефекты на ранней стадии.

Внедрение объективных инструментальных методов мониторинга технического состояния становится стратегической задачей для повышения надежности и ресурса сельскохозяйственной техники. Одним из эффективных решений является программно-аппаратный комплекс «Виброметр» компании Zetlab, специально разработанный для измерения и комплексного анализа параметров вибрации (амплитуды, частоты, фазы). Его функционал позволяет не только фиксировать мгновенные значения виброскорости, виброперемещения и виброускорения, но и проводить их углубленный анализ благодаря мощным средствам визуализации данных в виде графиков и диаграмм [8].

Основная часть. Вибрация является неотъемлемым и одним из наиболее разрушающих факторов, воздействующих на узлы и агрегаты сельскохозяйственных машин. Если в стационарном промышленном оборудовании источником колебаний часто является сам механизм, то в агротехнике вибрационный фон формируется комплексно: работой ДВС, взаимодействием ходовой системы (особенно колесных тракторов и комбайнов) с неоднородным рельефом поля, ударными нагрузками от рабочих органов (ножей, молотилок,

копателей), а также динамическими силами в трансмиссии. Такая полигармоническая и нестационарная вибрация приводит к ряду специфических проблем:

1. Ускоренная усталость металла в сварных швах, рамах и кронштейнах [4].
2. Самоотвинчивание резьбовых соединений (крепеж кабин, навесного оборудования, колесных дисков).
3. Износ и разрушение подшипниковых узлов в опорах валов отбойных барабанов, вентиляторов, насосов гидросистем.
4. Снижение герметичности соединений топливной и гидравлической систем.

Контроль вибрационной нагрузки на сельхозтехнику важен не только для сохранения ее ресурса, но и для обеспечения безопасности оператора, чье рабочее место подвержено длительному воздействию колебаний. Нормирование этого воздействия осуществляется на основании ГОСТ 12.1.012-2004 «Вибрационная безопасность. Общие требования» [8]. Однако для целей предиктивной диагностики и оценки технического состояния самой машины, измерения должны выходить за рамки санитарных норм и проводиться непосредственно на контролируемых узлах (подшипниках, редукторах, рамах) в характерных режимах эксплуатации. Это требует применения специализированных виброизмерительных приборов, способных работать в полевых условиях [6].

Программно-аппаратный комплекс «Виброметр» отвечает этим требованиям, позволяя проводить измерения на движущейся технике, анализировать данные в реальном времени и выявлять аномалии, сигнализирующие о развивающихся дефектах задолго до их критического проявления [7].

Рассмотрим принцип работы программы «Виброметр» для оценки вибрации, возникающей при работе сельскохозяйственной техники (рис. 1).



Рисунок 1. Лабораторный комплекс для измерения вибрации на примере комбайна Terrion 2010

С помощью акселерометров (пьезодатчиков), подключенных к входным каналам анализаторов сигнала (рис. 2) измеряются среднеквадратические и пиковые значения виброускорения, виброскорости и виброперемещения [1].

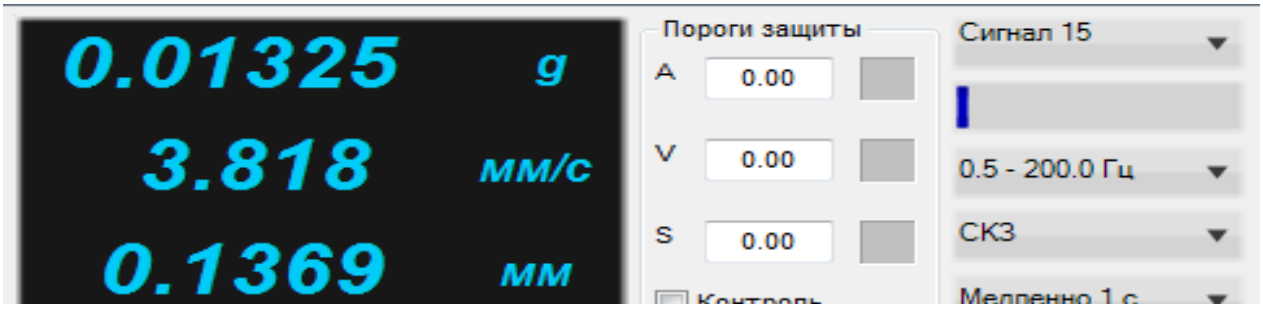


Рисунок 2. Среднеквадратические и пиковые значения виброускорения, виброскорости и виброперемещения

Программа создает виртуальные каналы мгновенных значений виброскорости, виброперемещения, виброускорения (рис. 3-5).

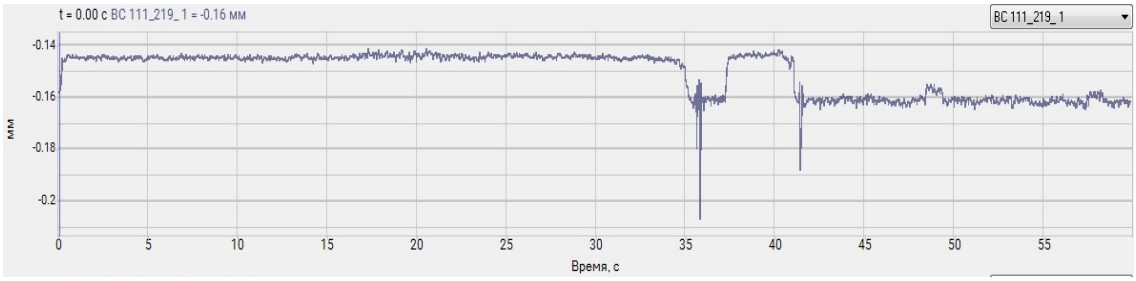


Рисунок 3. График зависимости виброперемещения от времени (t)

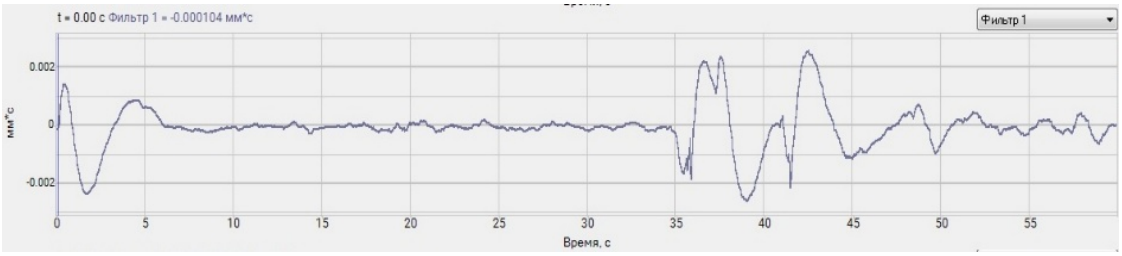


Рисунок 4. График зависимости виброскорости от времени (t)

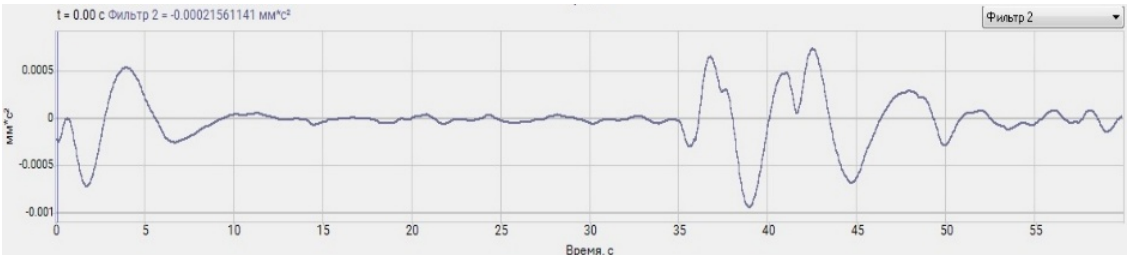


Рис 5. График зависимости виброускорения от времени (t)

Назначение данной программы заключается в измерении и анализе вибрации или колебаний объекта [1, 3, 5]. Она используется для контроля состояния объектов и обнаружения возможных проблем или неисправностей:

1. Измерение вибрации: программа позволяет измерять уровень вибрации объекта с высокой точностью и надежностью. Она предоставляет данные о частоте, амплитуде и других параметрах колебаний.

2. Анализ вибрации: программа обрабатывает полученные данные и проводит анализ вибрации объекта. Она может определить наличие аномалий, несоответствий или неисправностей, которые могут привести к повреждению или поломке объекта.

3. Контроль состояния объектов: программа позволяет постоянно контролировать состояние объектов и отслеживать любые изменения в их вибрации. Это позволяет оперативно реагировать на возможные проблемы и принимать меры по их устранению.

4. Обнаружение проблем и неисправностей: благодаря программе можно обнаружить возможные проблемы или неисправности объекта на ранних стадиях. Это помогает предотвратить серьезные повреждения и снижает риски аварий или поломок.

5. Предотвращение повреждений: программа помогает предотвратить возможные повреждения объектов, определяя и устраняя причины вибрации. Она позволяет принять необходимые меры по исправлению или предотвращению проблем, что способствует продлению срока службы объектов.

6. Многообластное применение: программа может быть использована в различных областях, таких как инженерия, машиностроение, электроника, технический сервис, медицина. Она является важным инструментом для контроля и обслуживания различных типов объектов, включая механизмы, технические системы, строительные конструкции и медицинское оборудование [2].

Принцип работы программы состоит в следующем:

1. Сбор данных: программа считывает данные с датчика, который может быть установлен на объекте или рядом с ним. Датчик может быть акселерометром, гироскопом или другим устройством, способным измерять вибрацию.

2. Обработка данных: программа анализирует данные, полученные с датчика. Она может использовать различные алгоритмы и методы обработки сигналов для выявления основных характеристик вибрации, таких как амплитуда, частота и форма вибрации.

3. Визуализация результатов: программа отображает результаты анализа в виде графиков или числовых значений. Это позволяет пользователям легко интерпретировать данные и определить наличие каких-либо проблем или неисправностей.

4. Дополнительные функции: некоторые программы могут предлагать дополнительные функции, такие как определение частотных характеристик объекта, диагностика неисправностей или предсказание возможных отказов [2].

Выводы. Интеграция программно-аппаратного комплекса «Виброметр» в систему обслуживания агротехники способствует значительному повышению ее надежности и готовности к работе в напряженные периоды, сокращению затрат на внеплановые ремонты и увеличению межремонтных интервалов за счет планирования ТО по фактическому состоянию. Кроме того, система предоставляет инструментальные данные для проверки соответствия условий труда оператора требованиям вибрационной безопасности согласно ГОСТ 12.1.012-2004.

Следовательно, программный комплекс «Виброметр» является не просто измерительным прибором, а ключевым элементом современной цифровой системы управления жизненным циклом и эксплуатационной готовностью сельскохозяйственной техники.

Список использованных источников

1. Булавинцев, Р. А. Механизация растениеводства. Практикум: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Р. А. Булавинцев, А. В. Волженцев, А. В. Козлов, А. С. Комоликов, А. М. Полохин, И. Е. Пупавцев. – Орел: [б. и.], 2023. – 269 с.: ил.

2. Виброметр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://zetlab.com/shop/programmnoe-obespechenie/funktsii-zetlab/izmerenie/vibrometr/. (дата

обращения 01.12.2025).

3. ГОСТ 12.1.012-2004. Вибрационная безопасность. Общие требования. – Введ. 2005-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 32 с. – Текст: электронный. – URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/document/SHUM/VIBR/GOST12_1_012_2004.pdf (дата обращения: 01.12.2025).

4. Григорьев, А. В. О качественном различии процессов статической и динамической калибровки виброметров, использующих размытие изображения круглой метки / А. В. Григорьев, М. В. Фомин, И. Ю. Наумова, В. А. Трусов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2018. – Т. 2. – С. 79–82.

5. Клевец, К. В. Цифровой виброметр на основе пьезоэффекта / К. В. Клевец, А. А. Мирошниченко, А. Д. Тарасов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 7-1 (18-1). – С. 480–484.

6. Комоликов, А. С. Перемешивающее устройство с управляемым электромагнитным виброприводом / А. С. Комоликов, Е. В. Мищенко, Н. А. Березина, И. В. Червонова // Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 3–8.

7. Кошеков, К. Т. Модернизация виброанализаторов на основе идентификационных измерений / К. Т. Кошеков, Ю. Н. Кликушин, А. А. Савостин, Н. Н. Софьина, Н. В. Астапенко, А. А. Кашевкин, Б. В. Кошекова // Дефектоскопия. – 2018. – № 5. – С. 26–32.

8. Мищенко, Е. В. Использование датчиков и приборов в АПК / Е. В. Мищенко, А. Н. Ховрин, Н. Д. Шманев, Д. А. Анненков // Рост и воспроизводство научных кадров в АПК : сборник трудов по итогам Российской национальной научно-практической интернет-конференции для обучающихся и молодых ученых, 18-19 декабря 2019 г. / под общ. ред. Н. Н. Бессчетновой ; Нижегородская ГСХА. – Нижний Новгород, 2020. – С. 320–325.

Bibliography

1. Bulavintsev R. A. Mechanization of crop production. Practicum: a textbook for students of higher educational institutions / R. A. Bulavintsev, A.V. Volzhentsev, A.V. Kozlov, A. S. Komolikov, A.M. Polokhin, I. E. Pupavtsev. – Orel: [B. I.], 2023. – 269 p.: ill.

2. Vibrometer [Electronic resource]. – Access mode: https://zetlab.com/shop/programmnoe-obespechenie/funktsii-zetlab/izmerenie/vibrometr /. (accessed 12/01/2025).

3. GOST 12.1.012-2004. Vibration safety. General requirements. – Introduction. 2005-01-01. – Moscow: Standartinform, 2005. – 32 p. – Text: electronic. – URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/document/SHUM/VIBR/GOST12_1_012_2004.pdf (date of reference: 12/01/2025).

4. Grigoriev A.V. On the qualitative difference between the processes of static and dynamic calibration of vibrometers using round mark image blurring / A.V. Grigoriev, M. V. Fomin, I. Yu. Naumova, V. A. Trusov // Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". - 2018. – Vol. 2. – pp. 79-82.

5. Klevets K. V. Digital vibrometer based on piezoelectric effect / K. V. Klevets, A. A. Miroshnichenko, A.D. Tarasov // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3, No. 7-1 (18-1). pp. 480-484.

6. Komolikov A. S. Mixing device with a controlled electromagnetic vibration drive / A. S. Komolikov, E. V. Mishchenko, N. A. Berezina, I. V. Chervonova // Intelligent systems in the agricultural and construction complex: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, 2022, pp. 3-8.

7. Koshekov K. T. Modernization of vibration analyzers based on identification measurements / K. T. Koshekov, Yu. N. Klikushin, A. A. Savostin, N. N. Sofina, N. V. Astapenko, A. A. Kashevkin, B. V. Koshekova // Flaw detection. - 2018. – No. 5. – pp. 26-32.

8. Mishchenko E. V. The use of sensors and devices in agriculture / E. V. Mishchenko, A. N. Khovrin, N. D. Shmanev, D. A. Annenkov // Growth and reproduction of scientific personnel in agriculture : proceedings based on the results of the Russian National Scientific and Practical Internet Conference for students and young scientists, December 18-19 2019 / under the general editorship of N. N. Besschetnova ; Nizhny Novgorod State Agricultural Academy. Nizhny Novgorod, 2020. pp. 320-325.

Роман Алексеевич Булавинцев, *кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Механизации технологических процессов в АПК»*

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;

Алексей Сергеевич Комоликов, *ассистент кафедры «Механизации технологических процессов в АПК»*

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69, тел. +79103071046, e-mail: komolikovaleksey1994@mail.ru

Андрей Владимирович Волженцев, *кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизации технологических процессов в АПК»*

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;

Алексей Михайлович Полохин, *кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизации технологических процессов в АПК»*

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;

Игорь Евгеньевич Пупавцев, *ст. преподаватель кафедры «Механизации технологических процессов в АПК»*

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69.

PPLICATION OF THE VIBROMETER SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR MONITORING AND ANALYZING VIBRATION PARAMETERS OF AGRICULTURAL MACHINERY

R.A. Bulavintsev, A.S. Komolikov, A.V. Volzhentsev, A.M. Polokhin, I.E. Pupavtcev

Orel State Agrarian University

Annotation: The article discusses the problem of vibration loads as a key factor in the deterioration and reduction of reliability of agricultural machinery. The application of the Vibrometer software and hardware complex (Zetlab) for measuring and analyzing vibration parameters (vibration velocity, vibration displacement, vibration acceleration) in real-world operating conditions is described. The principles of the complex's operation are considered,

including data collection using accelerometers, signal processing and visualization of results. It is shown that the use of a "Vibrometer" makes it possible to switch to predictive maintenance, increase the availability of equipment, reduce repair costs and ensure compliance of working conditions with vibration safety requirements.

Keywords: vibrometer, agricultural machinery, vibration diagnostics, vibration velocity, vibration displacement, vibration acceleration, condition monitoring, accelerometer, occupational safety.

Roman Alekseevich Bulavintsev, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Mechanization of Technological Processes in the Agricultural Sector
Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019;
Aleksey Sergeevich Komolikov, Assistant Professor, Department of Mechanization of Technological Processes in the Agricultural Sector
Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019; Tel.: +79103071046, Email: komolikovaleksey1994@mail.ru
Andrey Vladimirovich Volzhentsev, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanization of Technological Processes in the Agricultural Sector
Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019. General Rodin St., 69;
Alexey Mikhailovich Polokhin, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanization of Technological Processes in the Agricultural Sector
Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin St., Oryol, 302019;
Igor Evgenievich Pupavtsev, Senior Lecturer, Department of Mechanization of Technological Processes in the Agricultural Sector
Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin St., Oryol, 302019.

УДК 631.58:631.421.1

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВОГО ОПЫТА ЦТЗ КАК ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Беленков А.И.

ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, г. Лобня

Аннотация. *Приведены данные по определению азотного статуса посевов озимой пшеницы с целью проведения своевременной и качественной подкормки. Равномерное по площади поля внесение удобрений при неоднородном составе питательных веществ в почве приводит к их локальной передозировке или недостаточности. Применение данной технологии позволяет сократить затраты на применение удобрений. Неоднородность почвенных свойств оказывает существенное влияние на развитие посевов озимой пшеницы. Это может проявляться в недружном появлении всходов, неравномерной перезимовке и формировании неоднородного посева. Именно в этом случае наиболее эффективно применять такой элемент точного земледелия, как дифференцированное внесение подкормок минеральными удобрениями. В связи со сказанным, целью наших исследований было - обоснование дифференцированного внесения азотных подкормок при возделывании озимой пшеницы.*

Ключевые слова: *точное земледелие, технологии, обработка почвы, подкормка, аммиачная селитра, дифференцированное внесение, окупаемость.*

Ведение. Одно из наиболее перспективных направлений развития современного земледелия является точное земледелие, получившее широкое распространение в мире, в последние два десятилетия активно апробируемое в России. В основе научной концепции точного земледелия лежит представление о наличии неоднородностей в пределах одного поля. Для ее оценки используются системы глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС), специальные датчики, аэрофотоснимки и снимки со спутников и беспилотников, специальные элеменьы цифровизации и автоматизации, программы для агроменеджмента на базе геоинформационных систем (ГИС). Применение точного земледелия позволяет резко повысить урожайность с.-х. культур, улучшить качество продукции, сократить материальные и денежные затраты [7].

Методика исследований. Полевые исследования проводились в опыте Центра точного земледелия (ЦТЗ) РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева по изучению составных элементов точного земледелия. В данной статье приводятся данные только по одной культуре – озимой пшеницы, входящей в состав экспериментального севооборота: викоовсяная смесь – озимая пшеница – картофель - ячмень. Схемой опыта предусмотрены два фактора – технология возделывания (традиционная, точная) и прием обработки почвы под озимую пшеницу (отвальная, нулевая) [1, 2].

В течение нескольких вегетационных сезонов сотрудники Центра точного земледелия обследовали поля озимой пшеницы с помощью приборов Green Seeker RT 200 и N-tester и N-sensor ALS (рисунки 1, 2).



Рисунок 1 - Система RT-200 Green Seeker в работе



Рисунок 2 - Работа системы N Sensor ALS с машиной для внесения удобрений

Информация, получаемая при использовании указанных приборов, представлялась в виде электронных карт, обрабатываемых при помощи компьютерной программы SMS Advanced и представляемой в виде ГИС.

Цель наших исследований – обоснование дифференцированного внесения азотных подкормок при возделывании озимой пшеницы. Неоднородность почвенных свойств оказывает существенное влияние на развитие посевов. Это может проявляться в недружном появлении всходов, неравномерной перезимовке и формировании неоднородного посева. Именно в этом случае наиболее эффективно применять такой элемент точного земледелия, как дифференцированное внесение подкормок.

Результаты и обсуждение. В полевом опыте Центра точного земледелия проведение корневых подкормок аммиачной селитрой проводилось дважды за вегетационный сезон: после схода снега (при возобновлении вегетации ранней весной) и в фазу колошения. Первая подкормка обеспечивала нормальное развитие посевов, т.е. формирование продуктивной биомассы, вторая подкормка предназначена для налива зерна высокого качества (с содержанием белка на уровне 13-14%). Обе подкормки проводились с учетом развития биомассы посевов. Для решения вопроса был предложен алгоритм дифференцированного внесения азотных удобрений для формирования урожая высокого качества. Алгоритм разработан на основе карт биомассы, построенных с помощью оптических датчиков с применением навигационных систем. На поле опыта ЦТЗ в течение вегетационного сезона проводились исследования биомассы озимой пшеницы во время вегетации. Во второй половине апреля в момент отрастания растений после зимы отмечалась большая неоднородность посевов, связанная с неравномерностью после перезимовки, применением разных технологий и неоднородностью почвенных свойств. По краям поля обнаруживался краевой эффект, красными цветом показаны места, где посевы были изреженными и слабыми. Первая подкормка озимой пшеницы в режиме on-line с одновременным снятием показаний биомассы культуры проводилась в конце апреля [3]. Алгоритм внесения азотных удобрений в фазу выхода в трубку (ЕС 30–36) приведен на рисунок 3.



Рисунок 3 - Алгоритм внесения азотных удобрений на озимой пшенице в фазу выхода в трубку (ЕС 30–36)

Согласно данному алгоритму при достижении биомассы посева ниже средней, доза вносимых удобрений увеличивалась и это должно привести к выравниванию всей биомассы посевов. В то же время, если биомасса посева в какой-либо части поля снижалась до определенного критически низкого значения, то удобрение здесь давалось в минимальной дозировке или не вносилось совсем, что позволяло использовать алгоритм по трем предлагаемым сценариям: 1 — внесение повышенных доз для выравнивания отстающих в развитии посевов, 2 — внесение средних доз для нормально развитых посевов и 3 — внесение минимальных доз для выбракованных частей поля, где состояние посевов неудовлетворительное [4]. Стандартная доза удобрений на варианте традиционного земледелия по всей площади поля независимо от состояния посевов в 2016 г. составляла 70 кг/га д.в. азота на варианте точного земледелия дозы азота в подкормке изменялись в зависимости от состояния биомассы. К примеру, доза 65–70 кг/га была внесена на 12,7 % площади поля, доза 70–80 кг/га - на 66 %, свыше 80 кг/га - на 21 %.

Помимо картограммы распределения почвенных свойств в точном земледелии необходимо использовать картограммы биомассы посевов в различные фазы вегетации в режиме реального времени. Такие исследования проводились с различными целями. Во-первых, по состоянию посевов в начале вегетации можно дать прогноз урожайности. Во-вторых, оперативное обследование посевов в определенные фазы развития служило обоснованием для внесения определенных доз удобрений в виде подкормок. В-третьих, обследование посевов в конце вегетации и дробный учет урожайности позволяет сделать вывод о неоднородности почвенных свойств. Можно отметить, что после внесения азотных удобрений биомасса озимой пшеницы стала более равномерной по полю. Однако «провал» биомассы четко прослеживается как в северо-восточном углу поля, где внесено 70 кг/га азота по традиционной технологии, так и на участке с исторически низкой урожайностью в юго-восточном углу поля, где заведомо была снижена доза азота (по технологии точного земледелия) (рисунок 4) [5].

После уборки была построена карта урожайности озимой пшеницы (рисунок 5).

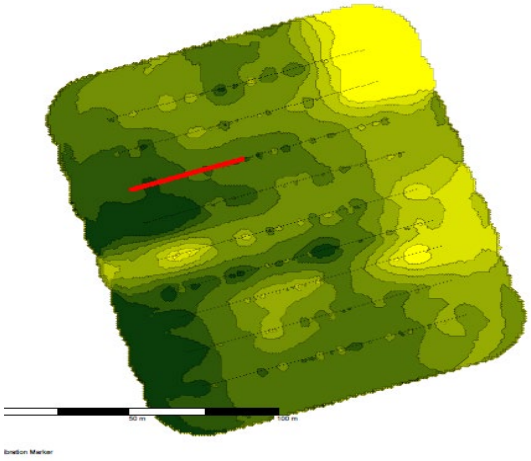


Рисунок 4 - Карта распределения NDVI пшеницы, 2016 г.

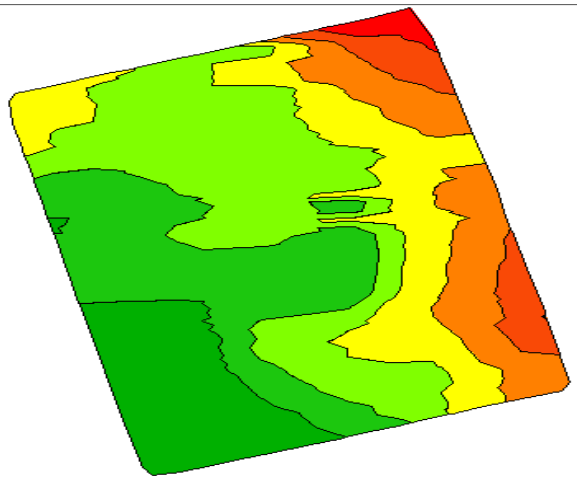


Рисунок 5 - Карта урожайности посевов озимой озимой пшеницы, 2016 г.

Наиболее контрастна разница в урожайности озимой пшеницы в 2016 г. при сравнении неудобренных и удобренных делянок по нулевой обработке на точной и по вспашке на традиционной технологии. Она составила соответственно 1,64 и 1,38 т/га. По отвальной обработке на точной технологии различия составляли 1,32 т/га, по нулевой при традиционной – 1,57 т/га. Существенной разницы между урожайностью озимой пшеницы при возделывании по точной и традиционной системе в 2016 г. не выявлено. При сравнении двух вариантов обработки почвы (отвальная и нулевая) отмечено, что урожайность озимой пшеницы выше на прямом посеве на 0,5 т/га. Наибольшая разница в урожайности по вариантам опыта связана с применением азотных подкормок. На фоне применения двух азотных подкормок в дозах 2×70 кг/га в традиционном земледелии или 2×60-80 (дифференцированно) кг/га в точном земледелии урожайность повышается по сравнению с контролем на 1,3-1,6 т/га [6]. Критерием оценки технологии является не только урожайность, но экономическая эффективность (таблица 1).

Таблица 1 - Рентабельность применения азотных подкормок и их окупаемость при возделывании озимой пшеницы в опыте ЦТЗ в среднем за 2016 г.

Технология (фактор А)	Обработка почвы (фактор В)	Подкормка азотом, кг (фактор С)	Урожайность, т/га	Прибавка урожайности, т/га	Окупаемость азота подкормок зерном, кг/кг	Рентабельность применения подкормок, %
Точная	отвальная	2х70-дифференцировано	6,31	1,32	18,86	138
		контроль	4,99	-	-	-
	нулевая	2х70-дифференцировано	6,89	1,64	23,43	184
		контроль	5,25	-	-	-
Традиционная	отвальная	2х70-дифференцировано	6,25	1,38	19,71	147
		контроль	4.87	-	-	-
	нулевая	2х70-дифференцировано	6,71	1,57	22,43	174
		контроль	5,14	-	-	-

При вспашке урожайность пшеницы была ниже, чем при нулевой обработке, окупаемость применения азота зерном и рентабельность применения подкормок была также выше при нулевой обработке.

В таблице 2 представлены урожайные данные за период 2009-16 гг., когда в опыте ЦТЗ строго учитывались все принципы вариантов технологий и обработок почвы.

Таблица 2 - Урожайность озимой пшеницы за две ротации севооборота в зависимости от технологии и приема обработки почвы, т/га (2009-2016 гг.)

Технология возделывания (фактор А)	Обработка почвы (фактор В)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	сред-нее
Традиционная	отвальная	4,23	4,50	3.65	6,31	5,80	2.75	6,74	5,00	4,87
	нулевая	5,09	3.85	3.53	6,15	5,62	4.59	6,73	5,52	5,14
Точная	отвальная	4,28	4,63	3,70	6,52	6,12	2,78	6,75	5,11	4,99
	нулевая	5,18	4.11	3.55	6,35	5,87	4,56	6,75	5,60	5,25
НСР, т/га	Фактор А	0,11	0,19	0,06	0,20	0,23	0,05	0,03	0,10	-
	Фактор В	0,42	0,34	0,07	0,14	0,17	0,46	0,07	0,33	-

Заключение. Сравнение технологий возделывания озимой пшеницы обусловило тенденцию преимущества точной технологии в сравнении с традиционной. Точное земледелие преобладало над традиционным в среднем за период исследований по отвальной обработке на 0,12 т/га, по нулевой обработке на 0,11 т/га. Прямой посев давал более высокую урожайность, составляя в среднем прибавку относительно вспашки на традиционном земледелии – 0,27 т/га, на точном – 0,26 т/га. В целом полевой опыт решил ряд важных задач по внедрению и освоению точного земледелия в условиях полевого опыта Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. В 2022 г. работа Центра была прекращена по ряду объективных и субъективных обстоятельств.

Список использованных источников:

1. Агробиотехнологии XXI века: коллективная монография / Коллектив авторов –М.: ООО «Мегаполис», 2022. 516 с.

2. Балабанов В.И. и др. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие: учебное пособие. М. Изд-во РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2013. 148 с.

3. Беленков А.И., Железова С.В., Березовский Е.В., Мазиров М.А. Элементы технологии точного земледелия в полевом опыте РГАУ –МСХА имени К.А. Тимирязева // Известие ТСХА. 2011. Вып. 6. С. 90-100.

4. Беленков А.И., Полин В.Д., Железова С.В. Результаты опыта Центра точного земледелия РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева // Нивы России. 2018. №5. С. 48-53.

5. Мазиров М.А., Матюк Н.С., Полин В.Д., Малахов Н.В. Влияние различных систем обработки и удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы // Земледелие. 2018. №2. С. 33-38.

6. Матюк Н.С., Малахов Н.В. Роль азотных подкормок в повышении плодородия дерново-подзолистой почвы и продуктивности севооборотов // Доклады ТСХА. 2017. № 289. С. 16-18.

7. Точное сельское хозяйство (precision agriculture) / Под ред. Д. Шпаара, А.В.

Захаренко, В.П. Якушева.- СПб-Пушкин, 2009. 400 с.

Беленков А.И.
ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, г. Лобня
E-mail: belenokaleksis@mail.ru

RESULTS OF A FIELD EXPERIMENT WITH A CTZ AS AN EXAMPLE OF THE USE OF AUTOMATION AND DIGITALIZATION IN PRECISION FARMING

Belenkov, A.I.

V.R. Williams Federal Scientific Center for Forage Production and Agroecology, Lobnya

Abstract. This paper presents data on determining the nitrogen status of winter wheat crops for the purpose of timely and high-quality fertilization. Uniform application of fertilizers across a field with uneven nutrient composition in the soil leads to localized overdose or deficiency. The use of this technology allows for a reduction in fertilizer application costs. Heterogeneity of soil properties has a significant impact on the development of winter wheat crops. This can manifest itself in uneven emergence, uneven overwintering, and the formation of uneven seedlings. It is in this case that the use of precision farming techniques such as variable-rate application of mineral fertilizers is most effective. Therefore, the goal of our research was to justify the variable-rate application of nitrogen fertilizers in winter wheat cultivation.

Keywords: precision farming, technology, soil cultivation, fertilizer application, ammonium nitrate, variable-rate application, cost-effectiveness.

Belenkov, A.I.
V.R. Williams Federal Scientific Center for Forage Production and Agroecology, Lobnya
E-mail: belenokaleksis@mail.ru

УДК 629.3.07

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМОЙ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.И. Азнагуловов, А.В. Линенко, В.В. Лукьянов

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

Аннотация. *В данной работе представлена разработка и внедрение мехатронной системы рулевого управления для параллельного вождения машинно-тракторным агрегатом. Система включает электропривод, датчики наклона и угла поворота колес, спутниковый навигационный модуль и программное обеспечение для автоматического управления движением МТА по заданному курсу. Проведены испытания системы при внесении жидких минеральных удобрений на озимой пшенице, что позволило оценить её эффективность. Результаты показали увеличение урожайности на 8,5%, снижение издержек и повышение точности выполнения операции по сравнению с традиционными методами. Внедрение автоматизированной системы способствует повышению производительности труда, снижению утомляемости оператора и оптимизации расхода ресурсов, что делает её актуальной для отечественного агропромышленного комплекса.*

Ключевые слова: *параллельное вождение, мехатронная система, точное земледелие, машинно-тракторный агрегат.*

Введение. Эффективное использование цифровых технологий в сельском хозяйстве может значительно увеличить урожайность, снизить издержки на производство и минимизировать воздействие на окружающую среду. Наиболее перспективно использовать цифровые технологии в системе точного земледелия, позволяющие оптимизировать использование ресурсов, таких как вода, удобрения и пестициды, в соответствии с индивидуальными особенностями каждого участка поля [3,4,6]. Одним из важных критериев системы точного земледелия является точность обработки сельскохозяйственных культур с целью минимизации эксплуатационных затрат и снижения повреждения посадок при прохождении всего цикла технологических операций. Одним из способов достижения этой цели, является управление движением агрегата с помощью навигации, в том числе систем автопилотирования, способных корректировать траекторию движения машинно-тракторного агрегата (далее – МТА).

Наряду с этим, применение зарубежных систем автоматического управления движением МТА, в частности систем подруливания, на отечественной сельскохозяйственной технике затруднено вследствие несогласованности конструктивных параметров, высокой стоимости и зависимости от зарубежных сервисов (возможность удаленного отключения) [1].

Существующие отечественные системы параллельного вождения позволяют машинисту-механизатору управлять движением по курсоуказателю (агронавигатору), однако отсутствуют системы, обеспечивающие движение колесных машин без участия машиниста-механизатора [8]. С учетом этого разработка отечественных систем параллельного вождения колесных машин в агропромышленном комплексе является актуальной задачей.

Целью исследования является повышение эффективности выполнения

сельскохозяйственных операций путем разработки и применения мехатронной системы рулевого управления для параллельного вождения машинно-тракторным агрегатом. **Задачей** исследования является определение эффективности мехатронной системы мехатронной системы рулевого управления.

Условия, материалы и методы.

Структурная схема разработанной мехатронной системы рулевого управления состоит из следующих элементов: электропривод подруливающего устройства, датчики наклона и угла поворота колес, приёмник GPS/ГЛОНАСС, программы управления МТА [2,5,7].

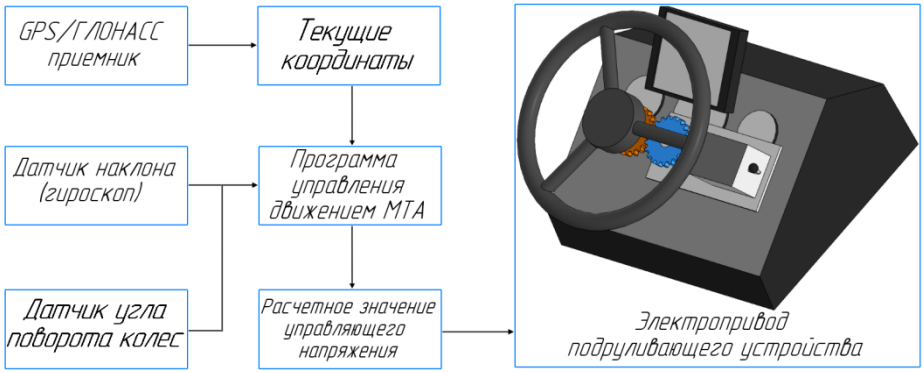


Рисунок 1 - Структурная схема системы параллельного вождения МТА

Алгоритм работы выполняется в следующей последовательности: сначала устанавливается маршрут, после чего МТА начинает движение, и система непрерывно осуществляет следующие действия. Сигналы со спутников принимаются GPS/ ГЛОНАСС – приёмником (4) и передаются в программу управления движением МТА, расположенную в электронном блоке управления (2) (рисунок 2).



Рисунок 2 - Мехатронная система рулевого управления для параллельного вождения МТА

Сигнал с датчика угла поворота управляемых колес (3) идёт на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), затем в программу управления движением МТА. На их основании программа вычисляет скорость, направление движения, величину отклонения от задаваемой траектории, а затем, по закону управления движением реализует маневры приближения текущей траектории к необходимой. При этом генерируются сигналы, которые пройдя через

цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), в виде напряжения поступают на электропривод руля (1) на базе электродвигателя постоянного тока с рабочим напряжением 12 В, который поворачивает рулевое колесо МТА на необходимый угол посредством зубчатой передачи [2,4]. Такая система обеспечивает более высокую точность движения по курсу без вмешательства оператора.

Для определения эффективности мехатронной системы была произведена одна из наиболее распространенных сельскохозяйственных операций, требующая высокой точности – внесение жидких минеральных удобрений (ЖМУ).

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный. Испытания проводились на озимой пшенице с внесением ЖМУ при помощи опрыскивателя «Заря» с шириной захвата 21м и трактора Беларус 82.1 (Рисунок 3, а).





а) б)

Рисунок 3 – Полевые испытания мехатронной системы
а) Внесение ЖМУ (Беларус 82.1+опрыскиватель «Заря»);
б) Варианты опытов на озимой пшенице

Площадь обработки 200 Га, размещение систематическое (рисунок 3, б). В качестве подкормки вносили смешанный с водой Бионекс-Кеми жидкий (NPK 10:10:10, стимулятор роста) производства НВП «Башинком».

Схема внесения ЖМУ:

1. Контроль (традиционная технология) NPK 5л/га+200 л воды
2. При помощи агрнонавигатора – NPK 5л/га +200 л воды
3. При помощи разработанной мехатронной системы рулевого управления МТА – NPK 5л/га +200 л воды

Результаты и обсуждение. Мехатронная система рулевого управления для параллельного вождения МТА повышает количество продуктивных стеблей, длину колоса, массу 1000 зерен, и соответственно увеличивает урожайность пшеницы (таблица 1). Максимальная урожайность озимой пшеницы получена на варианте с разработанной мехатронной системой рулевого управления МТА и составила 2,55 т/га, что больше на 0,2 т/га, чем при внесении удобрений традиционным способом. Применение агронавигатора (курсоуказателя) позволило увеличить урожайность на 0,15 т/га, что показывает преимущества применения современных систем параллельного вождения, но более эффективнее оказалась разработана мехатронная система. Результат обеспечен благодаря наименьшим перекрытиям, количеству пропусков и повышенному вниманию машиниста-механизатора к технологии внесения ввиду отсутствия задачи по поддержанию МТА движения по заданному курсу.

Таблица 1 - Влияние дозы жидких удобрений на урожайность озимой пшеницы

Вариант	Схема опыта	Урожайность, т/га
1	Контроль (традиционная технология) NPK 5л/га+200 л воды	2,35
2	При помощи агронавигатора NPK 5л/га +200 л воды	2,5
3	При помощи разработанной мехатронной системы NPK 5л/га +200 л воды	2,55

Благодаря минимальному отклонению стало возможным уменьшить эксплуатационные затраты (удобрения и топливо), снизить утомляемость оператора и увеличить производительность труда (возможность работы в дневное и ночное время, а также в условиях плохой видимости).

Выводы. Себестоимость мехатронной системы рулевого управления для параллельного вождения МТА составляет 184,99 тыс.руб. (в ценах на 01.11.2023г.), а ее применение позволяет сэкономить 42,00 руб с 1 га при пятикратной листовой подкормки ЖМУ, согласно технологической карте возделывания озимой пшеницы. Общий экономический эффект, при годовом условном объеме 1000 га единицы наработки равен 42,00 тыс. руб., а срок окупаемости составит 4,4 года. При этом эксплуатационные затраты снизились на 3,3%, производительность МТА (га/смена) возросла на 7,7% при выполнении сельскохозяйственной операции, а урожайность (т/га) на 8,5%. Повышение эффективности выполнения сельскохозяйственных операций при параллельном вождении МТА мехатронной системой рулевого управления достигается снижением утомляемости оператора и увеличением производительности труда (возможность работы в ночное время, а также в условиях плохой видимости) и уменьшением эксплуатационных затрат.

Список использованных источников:

1. Азнагулов А. И. Повышение эффективности работы машинно-тракторного агрегата мехатронной системой рулевого управления: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1 / А. И. Азнагулов. — Уфа, 2024. — 145 с.

2. Линенко А. В. Мехатронная система для параллельного вождения машинно-тракторным агрегатом / А. В. Линенко, А. И. Азнагулов, В. В. Лукьянов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2025. – № 1(73). – С. 138-142. – DOI 10.31563/1684-7628-2025-73-1-138-142

3. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие / В. И. Балабанов, С. В. Железова, Е. В. Березовский [и др.]. – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2013. – 143 с. – ISBN 978-5-9675-0866-7. – EDN RLUIBJ.

4. Научно-обоснованный прогноз развития точного земледелия в России / Е. В. Рудой, М. С. Петухова, С. В. Рюмкин [и др.]. – Новосибирск : Золотой колос, 2021. – 138 с. – ISBN 978-5-94477-295-4. – EDN BLJFAQ.

5. Патент на полезную модель № 183287 U1 Российская Федерация, МПК A01B 69/04, B62D 5/04. Исполнительное устройство для автоматического управления машинно-тракторным агрегатом : № 2018114392 : заявл. 18.04.2018 : опубл. 17.09.2018 / А. В. Линенко, А. И. Азнагулов, М. М. Ямалетдинов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Башкирский государственный аграрный университет"

6. Труфляк Е. В. Мониторинг и прогнозирование научно-технологического развития АПК России на период до 2030 года / Е. В. Труфляк, Н. Ю. Курченко, А. С. Креймер [и др.]. – Саратов : Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2020. – 328 с. – ISBN 978-5-00140-548-1

7. Linenko A. V. Farm tractor mechatronic steering module / A. V. Linenko, I. I. Gabitov, S. F. Siraev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – Vol. 17, No. 3. – P. 354-361. – DOI 10.5937/jaes17-22052

8. Poddubny V. Mathematical simulation of controlled movement of wheeled vehicle in real time / V. Poddubny, A. Nenaidenko, A. Pavliuk // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Sochi, 25–29 марта 2019 года. – Sochi, 2019. – P. 8742919. – DOI 10.1109/ICIEAM.2019.8742919

Bibliography:

1. Aznagulov A. I. Improving the efficiency of a machine-tractor unit using a mechatronic steering system: Cand. Sci. (Eng.) Dissertation: 4.3.1 / A. I. Aznagulov. - Ufa, 2024. - 145 p.

2. Linenko A. V. Mechatronic system for parallel driving of a machine-tractor unit / A. V. Linenko, A. I. Aznagulov, V. V. Lukyanov // Bulletin of the Bashkir State Agrarian University. - 2025. - No. 1 (73). - P. 138-142. - DOI 10.31563/1684-7628-2025-73-1-138-142

3. Navigation technologies in agriculture. Coordinate farming / V. I. Balabanov, S. V. Zhelezova, E. V. Berezovsky [and others]. – Moscow: Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after. K.A. Timiryazeva, 2013. – 143 p. – ISBN 978-5-9675-0866-7. – EDN RLUIBJ.

4. Scientifically based forecast for the development of precision farming in Russia / E. V. Rudoy, M. S. Petukhova, S. V. Ryumkin [etc.]. – Novosibirsk: Golden Ear, 2021. – 138 p. – ISBN 978-5-94477-295-4. – EDN BLJFAQ.

5. Patent for Utility Model No. 183287 U1 Russian Federation, IPC A01B 69/04, B62D 5/04. Actuator for Automatic Control of a Machine-Tractor Unit: No. 2018114392: declared 18.04.2018: published 17.09.2018 / A. V. Linenko, A. I. Aznagulov, M. M. Yamaletdinov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bashkir State Agrarian University"

6. Truflyak E. V. Monitoring and Forecasting of Scientific and Technological Development of the Russian Agro-Industrial Complex through 2030 / E. V. Truflyak, N. Yu. Kurchenko, A. S. Kreymer [et al.]. – Saratov: Limited Liability Company "Amirit", 2020. – 328 p. – ISBN 978-5-00140-548-1

7. Linenko A. V. Farm tractor mechatronic steering module / A. V. Linenko, I. I. Gabitov, S. F. Siraev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – Vol. 17, No. 3. – P. 354-361. – DOI 10.5937/jaes17-22052

8. Poddubny V. Mathematical simulation of controlled movement of wheeled vehicle in real time / V. Poddubny, A. Nenaidenko, A. Pavliuk // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Sochi, 25–29 марта 2019 года. – Sochi, 2019. – P. 8742919. – DOI 10.1109/ICIEAM.2019.8742919

Азнагулов Айнур Иршатович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры электрических машин и электрооборудования ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. Адрес: г. Уфа, 50-лет Октября, 34, тел. +7 (347) 252-66-10

Линенко Андрей Владимирович – доктор технических наук, профессор, декан энергетического факультета ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. Адрес: г. Уфа, 50-лет Октября, 34, тел. +7 (347) 252-66-10, e-mail: Linenko-bsau@yandex.ru

Лукьянов Валерий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. Адрес: г. Уфа, 50-лет Октября, 34, тел. +7 (347) 252-66-10

INCREASING THE EFFICIENCY OF A MACHINE-TRACTOR UNIT WITH A MECHATRONIC STEERING SYSTEM

A.I. Aznagulov, A.V. Linenko, V.V. Lukyanov

FGBOU VO Bashkir State Agrarian University

Abstract. This paper presents the development and implementation of a mechatronic steering system for the parallel steering of a machine-tractor unit. The system includes an electric drive, wheel tilt and angle sensors, a satellite navigation module, and software for automatic control of the MTU along a specified course. The system was tested during liquid fertilizer application to winter wheat, allowing for an evaluation of its effectiveness. The results showed an increase in yield to 2.55 t/ha, a reduction in costs, and improved accuracy compared to traditional methods. The implementation of the automated system contributes to increased productivity, reduced operator fatigue, and optimized resource consumption, making it relevant for the domestic agro-industrial complex.

Keywords: parallel steering, mechatronic system, precision farming, machine-tractor unit.

Ainur Irshatovich Aznagulov – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher in the Department of Electrical Machines and Equipment at Bashkir State Agrarian University. Address: Ufa, 50-let Oktyabrya St., 34, Tel.: +7 (347) 252-66-10

Andrey Vladimirovich Linenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Power Engineering at Bashkir State Agrarian University. Address: Ufa, 50-let Oktyabrya St., 34, Tel.: +7 (347) 252-66-10, Email: Linenko-bsau@yandex.ru

Valery Vladimirovich Lukyanov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor in the Department of Power Supply and Automation of Technological Processes at Bashkir State Agrarian University. Address: Ufa, 50-let Oktyabrya St., 34, Tel.: +7 (347) 252-66-10

УДК 633.522

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЯЛЬНО-ТРЕПАЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ КОНОПЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ

А.Н. Жалнин, С.И. Головин, А.Л. Севостьянов, Р.А. Булавинцев, А.М. Полохин, А.С. Комоликов

ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

***Аннотация**: Статья посвящена анализу причин глубокого кризиса отечественного коноплеводства и поиску инновационного пути восстановления отрасли. Автор отмечает, что, несмотря на исторические лидерские позиции СССР, современная российская отрасль перестала существовать, не сумев адаптироваться к рыночным условиям. В то же время мировой рынок демонстрирует устойчивый рост, основанный на расширении промышленного применения продукции конопли и её экологического потенциала.*

В работе проведён сравнительный анализ двух доминирующих мировых моделей коноплеводства: высокомеханизированной «западной» (Канада, США, ЕС) и трудоёмкой «восточной» (Китай, Казахстан), унаследовавшей черты советской школы. Установлено, что оба направления обладают общим системным ограничением – зависимостью от стационарных заводов по первичной переработке сырья (пенькотресты), что снижает гибкость и увеличивает капиталоёмкость.

В качестве стратегической альтернативы для России предложена концепция адаптационного технологического пути. Её суть заключается в переносе операций первичной переработки непосредственно в поле с использованием комплекса специализированных и адаптированных сельскохозяйственных машин. Такой подход позволит децентрализовать производство, снизить логистические издержки, повысить рентабельность культуры и создать основу для формирования гибкой, экономически устойчивой и конкурентоспособной модели отечественного коноплеводства.

***Ключевые слова:** техническая конопля, коноплеводство в России, первичная переработка конопли, пенькотреста, пеньковолокно, сельскохозяйственная техника, адаптационный путь развития.*

Введение. Конопля посевная имеет глубокие исторические корни, что подтверждается её многовековым возделыванием в таких регионах, как Орловская область. Однако, несмотря на лидирующие позиции, которые СССР занимал в этой области, современное отечественное коноплеводство как комплексная экономическая отрасль находится в состоянии глубокого упадка. Главной причиной стала её системная неготовность к адаптации в условиях перехода от плановой к рыночной экономике. В то же время мировой рынок демонстрирует устойчивый рост, стимулируемый расширением областей промышленного применения продукции конопли и признанием её значительного экологического потенциала, в частности, способности к депонированию углерода. В связи с этим актуальным является поиск и обоснование инновационного пути восстановления российского коноплеводства, основанного на преодолении данного технологического ограничения [1].

Целью работы является анализ современных зарубежных моделей коноплеводства («западной» и «восточной») для выявления их ключевых технологических и экономических

ограничений, а также разработка на этой основе концепции адаптационного технологического пути развития отрасли в Российской Федерации.

Основная часть. Конопля техническая (посевная) – это одна из традиционных сельскохозяйственных культур в России. Ещё с 17 века Орловщина по праву считалась одним из ключевых регионов.

В настоящий момент можно признать, что такой отрасли, как коноплеводство в России сейчас не существует, хотя ещё три десятка лет назад мы по праву считались мировыми лидерами отрасли. Причина произошедшей стогнации вполне банальна. Коноплеводсво не смогло органично встроится в стремительно изменившиеся экономические условия (переход от административно-командной системы к рыночной).

Отрасль коноплеводства довольно сложна и многогранна, тесно переплетена с другими смежными отраслями экономики, что делает её крайне уязвимой к внезапно меняющимся макроэкономическим условиям. Для становления и устойчивого развития отрасли крайне важно создать подходящие условия и, в первую очередь, прочную экономическую и материально-техническую базу [5].

Если внимательно рассмотреть мировой опыт в отрасли коноплеводства, то можно заметить, что последние два десятилетия наблюдается взрывной рост в этом сегменте. Современные технологии значительно расширили сферу применения конопли и её производных в различных отраслях экономики. Так же немалую роль сыграл экологический потенциал культуры, ее способность поглощать большое количество CO_2 из атмосферного воздуха [3].

Опыт развития современного коноплеводства можно условно разделить на два основных направления: «западное» и «восточное». Канада, США, страны Евросоюза - западное направление развития. К его особенностям можно отнести следующие отличительные черты.

- использование высокотехнологичных узкоспециализированных сельхоз машин для уборки конопли;
- высокопроизводительные линии первичной переработки;
- тесные кооперационные и экономические взаимодействия между участниками отрасли.

К отрицательным моментам «западного» направления в коноплеводстве можно отнести недостаточную гибкость и низкую стрессоустойчивость к возможным макроэкономическим изменениям.

Восточный опыт коноплеводства (Китай, Казахстан и другие страны Средней Азии) в большей степени основывается и даже в чём то повторяет опыт Советской школы коноплеводства.

К отличительным особенностям «восточного» направления можно отнести:

- упрощённое сельскохозяйственное оборудование для уборки;
- массовое применение ручного труда (уборка пеньки снопами);
- низкая производительность труда;
- получение длинного волокна;
- высокие трудозатраты.

Проанализировав оба пути, (западный и восточный) можно обнаружить слабое звено - это первичная переработка конопли (пенькотресты). Именно этот сегмент отрасли не позволяет ей быть максимально гибкой и отзывчивой на изменяющиеся потребности рынка [4].

Во всех вариантах переработкой занимаются некие аналоги Советских пенькозаводов. В связи с этим возникает логичное предложение перейти на совершенно иной «адаптационный» путь развития коноплеводста посредствам применения специализированных сельхозмашин и адаптированной сельхозтехники.

К настоящему времени накоплен достаточный опыт в адаптации некоторых образцов как самоходной (комбайны), так и прицепной (пресс-подборщики, грабли) сельхозтехники.

Логичным развитием может стать создание образцов специализированных сельхозмашин, способных производить первичную переработку пенькотресты непосредственно в поле. Данный способ позволит в значительной мере повысить рентабельность конопли, как сельскохозяйственной культуры, а так же позволит насытить рынок доступным и недорогим пеньковолокном [2].

Выводы. Проведённый анализ подтвердил, что обе доминирующие мировые модели коноплеводства, несмотря на их различия, имеют общее системное уязвимое место — привязку к инфраструктуре стационарных пенькозаводов для первичной переработки тресты. Эта зависимость ограничивает адаптивность отрасли к рыночным колебаниям и повышает капитальные затраты на её организацию. В качестве стратегической альтернативы для России предложен адаптационный путь, сущность которого заключается в технологической модернизации ключевого производственного этапа [1,2]. Перенос операций первичной переработки непосредственно в поле с помощью комплекса специализированных машин позволит децентрализовать производство, резко снизить логистические издержки и минимизировать зависимость от крупных перерабатывающих мощностей. Реализация данного подхода создаст основы для формирования новой, экономически устойчивой и технологически современной модели отечественного коноплеводства, способной эффективно реагировать на запросы рынка и обеспечить его конкурентоспособным сырьём. Таким образом, будущее отрасли связано с целенаправленным технологическим прорывом в области полевой переработки конопляного сырья.

Список использованных источников

1. Баженов, А. А. Коноплеводство как сельскохозяйственная культура: социальное значение и перспективы / А. А. Баженов, С. Н. Некрасов // Наука и современность: сборник статей студентов, магистрантов и аспирантов Уральского государственного аграрного университета по материалам круглого стола. – Екатеринбург, 2021. – С. 19–22.

2. Булавинцев, Р. А. Механизация растениеводства. Практикум: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Р. А. Булавинцев, А. В. Волженцев, А. В. Козлов, А. С. Комоликов, А. М. Полохин, И. Е. Пупавцев. – Орел: [б. и.], 2023. – 269 с.: ил.

3. Пат. 2772915 Рос. Федерация: МПК A01D 46/00. Способ уборки технической конопли на семена и тресту и многофункциональный агрегат для его осуществления / Игнатов В. Д., Ростовцев Р. А., Мкртчян С. Р., Попов Р. А., Пучков Е. М., Соловьев С. В.; заявитель и патентообладатель Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. – № 202111657; заявл. 07.06.2021; опубл. 27.05.2022. – 19 с.

4. Пат. 2826146 Рос. Федерация: МПК A01D 46/00. Многофункциональный агрегат и способ уборки технической конопли на семена и тресту / Васильев А. С., Алдошин Н. В., Голубев В. В., Фаринюк Ю. Т., Кудрявцев А. В., Кудласевич И. А., Блинов Ф. Л., Косячкова В. И., Ларин Д. В ; заявитель и патентообладатель Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. – № 2023133367; заявл. 12.12.2023; опубл. 04.09.2024. – 19 с.

5. Ростовцев Р. А., Попов Р. А., Пучков Е. М. Инновационный способ уборки

технической конопли и схема многофункционального агрегата для его осуществления // Аграрная наука. – 2023. – № 7. – С. 129–133.

Bibliography

1. Bazhenov, A. A. Hemp breeding as an agricultural crop: social significance and prospects / A. A. Bazhenov, S. N. Nekrasov // Science and modernity: a collection of articles by students, undergraduates and postgraduates of the Ural State Agrarian University based on the materials of the round table. Yekaterinburg, 2021. pp. 19-22.

2. Bulavintsev, R. A. Mechanization of crop production. Practicum: a textbook for students of higher educational institutions / R. A. Bulavintsev, A.V. Volzhentsev, A.V. Kozlov, A. S. Komolikov, A.M. Polokhin, I. E. Pupavtsev. – Orel: [B. I.], 2023. – 269 p.: ill.

3. Pat. 2772915 Russian The Federation: IPC A01D 46/00. A method of harvesting technical cannabis for seeds and trust and a multifunctional unit for its implementation / Ignatov V. D., Rostovtsev R. A., Mkrtchyan S. R., Popov R. A., Puchkov E. M., Solovyov S. V.; applicant and patent holder Federal Scientific Agroengineering Center VIM. – No. 202111657; application dated 06/07/2021; published 05/27/2022. – 19 p.

4. Pat. 2826146 Russian Federation The Federation: IPC A01D 46/00. Multifunctional unit and method of harvesting technical hemp for seeds and trust / Vasiliev A. S., Aldoshin N. V., Golubev V. V., Farinyuk Yu. T., Kudryavtsev A.V., Kudlasevich I. A., Blinov F. L., Kosyachkova V. I., Larin D. C ; applicant and patent holder Federal Scientific Agroengineering Center VIM. – No. 2023133367; application 12.12.2023; published 04.09.2024. – 19 p.

5. Rostovtsev R. A., Popov R. A., Puchkov E. M. An innovative method of harvesting industrial hemp and a scheme of a multifunctional unit for its implementation // Agrarian Science. - 2023. – No. 7. – pp. 129-133.

Алексей Николаевич Жалнин, студент (магистрант) ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;, email: alekseyjalnin@yandex.ru;

Сергей Иванович Головин, директор института инженерных систем и технологий, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатации машинно-тракторного парка и тракторы»,

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;

Александр Леонидович Севостьянов, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Эксплуатации машинно-тракторного парка и тракторы»

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;

Роман Алексеевич Булавинцев, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Механизации технологических процессов в АПК»

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;

Алексей Михайлович Полохин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизации технологических процессов в АПК»

ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69;

Алексей Сергеевич Комоликов, ассистент кафедры «Механизации технологических

процессов в АПК»
ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69,
тел. +79103071046, e-mail: komolikovaleksey1994@mail.ru

PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF A MILLING MACHINE FOR THE PRIMARY PROCESSING OF TECHNICAL CANNABIS

A.N. Zhalnin, S.I. Golovin, A.L. Sevostyanov, R.A. Bulavintsev, A.M. Polokhin, A.S. Komolikov

Orel State Agrarian University

Annotation: The article examines the historical background, the current state and prospects of the revival of hemp breeding in Russia. The author notes the decline of the once leading industry, attributing it to the inability to adapt to market conditions after the collapse of the administrative and command system. A comparative analysis of two modern global development models is carried out: the high-tech but insufficiently flexible "Western" path (USA, Canada, EU) and the labor-intensive "eastern" (China, Central Asia), preserving the features of the Soviet school. A common "weak link" for both models has been identified — dependence on stationary plants for primary processing of raw materials (hemp stands).

Keywords: technical hemp, hemp breeding in Russia, primary processing of hemp, hemp fiber, hemp fiber, agricultural machinery, adaptive development path.

Alexey Nikolaevich Zhalnin, , student (master's student) of the Orel State Agrarian University, 69 Generala Rodina str., Orel, 302019;, email: alekseyjalnin@yandex.ru ;
Sergey Ivanovich Golovin, Director of the Institute of Engineering Systems and Technologies, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Operation of the Machine and Tractor Fleet and Tractors",
Orel State Agrarian University, 69 Generala Rodina str., Orel, 302019;
Alexander Leonidovich Sevostyanov, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Department of "Operation of the machine and tractor fleet and tractors"
Orel State Agrarian University,
69 Generala Rodina str., Orel, 302019;
Roman Alekseevich Bulavintsev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Mechanization of Technological Processes in Agriculture"
Orel State Agrarian University, 69 Generala Rodina str., Orel, 302019;
Alexey Mikhailovich Polokhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Mechanization of Technological Processes in Agriculture"
Orel State Agrarian University, 69 Generala Rodina str., Orel, 302019;
Alexey Sergeevich Komolikov, Assistant Professor of the Department of "Mechanization of Technological Processes in Agriculture"
Orel State Agrarian University, 69 Generala Rodina str., Orel, 302019,
tel. +79103071046, e-mail: komolikovaleksey1994@mail.ru

УДК 631.171

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА ХОДОВОГО ВИНТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА В ТЕПЛИЦЕ

В.В. Васильев

[1]ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

Аннотация. *Для точного выполнения всех операций автономным роботом в теплице требуется правильное обоснование диаметра ходового винта. Представлена методика расчета диаметра ходового винта, отличительной особенностью которой является учет одновременного воздействия на ходовой винт изгибающего и крутящего моментов. При воздействии на ходовой винт изгибающего момента в обязательном порядке учитывается процентное распределения массы автономного робота на ограничитель и ходовой винт, способ крепления телескопической штанги к подвижной платформе, расположение в различных позициях автономного робота относительно опорных тележек. В свою очередь при воздействии на ходовой винт изгибающего момента принимается во внимание мощность серводвигателя и его угловая скорость, а также материал, из которого изготавливается ходовой винт.*

Ключевые слова: *роботизированная теплица, робот, опорная тележка, ходовой винт, диаметр, крутящий момент, изгибающий момент.*

Введение. Автоматизация процесса выращивания овощей и фруктов в защищенном грунте предусматривает в частности и разработку специальных роботизированных теплиц. На основе известных технических решений теплиц [1, 2], которые функционируют на базе автономных роботов, были разработаны роботизированные теплицы [3, 4, 5, 6, 7], одна из которых предназначена для выращивания овощей и фруктов по технологии вертикального земледелия [6, 7]. В разработанных теплицах используются автономные роботы, перемещающиеся по территории теплицы в продольном и поперечном направлениях. Поперечное перемещение автономного робота в теплице осуществляется посредством ходового винта, который приводится в движение серводвигателем, где диаметр ходового винта должен обеспечивать надежное перемещение автономного робота с заданной скоростью.

Материалы и методы исследования. Обеспечение надежности поперечного перемещения робота по территории теплицы в первую очередь зависит от правильного расчета диаметра ходового винта и выбора мощности серводвигателя. Согласно методике обоснования параметров специального пути для перемещения робота в теплице, представленной в работе [4], при перемещении робота в поперечном направлении в сечении ходового винта возникают изгибающий момент и крутящий момент, то есть присутствует сложное напряжение. В соответствии с третьей теорией прочности [4, 8, 9, 10, 11] (наибольших касательных напряжений) максимальный приведенный момент, возникающий в поперечном сечении ходового винта, составит [4]

$$M_{\max \text{ПХВ}} = \sqrt{M_{\text{СХВ}}^2 + M_{\text{КХВ}}^2}, \quad (1)$$

где $M_{\text{СХВ}}$ – суммарный изгибающий момент, Н·м;

$M_{\text{КХВ}}$ – крутящий момент, Н·м.

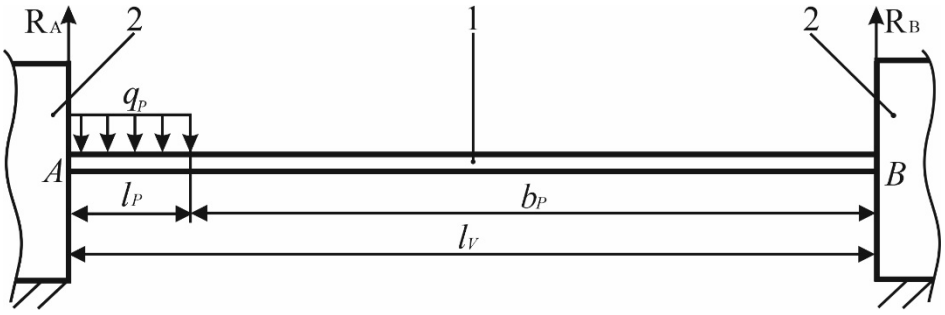
Результаты и обсуждение. В практических условиях при поперечном движении автономного робота по территории теплицы, он может принимать следующие три основные позиции. Первая – левое положение, когда подвижная платформа находится в крайней левой точке относительно продольной оси теплицы, где расстояние от правой стороны левой опорной тележки до левой стороны подвижной платформы оставляет 0 м, а расстояние от левой стороны правой опорной тележки до правой стороны подвижной платформы оставляет b_P м. Вторая – текущее положение, когда расстояние от правой стороны левой опорной тележки до левой стороны подвижной платформы оставляет b_{TL} м, а расстояние от левой стороны правой опорной тележки до правой стороны подвижной платформы соответствует b_{TP} м. Третья – это правое положение, когда подвижная платформа находится в крайней правой точке относительно продольной оси теплицы, где расстояние от левой стороны правой опорной тележки до правой стороны подвижной платформы оставляет 0 м, а расстояние от правой стороны левой опорной тележки до левой стороны подвижной платформы равно b_L м. На основании сказанного построены схемы нагрузки ходового винта от действия поперечной силы для каждой позиции, которые представлены на рисунке 1, где точка A – точка опоры ходового винта на левую опорную тележку, а точка B – точка опоры ходового винта на правую тележку; R_A и R_B – реакции опор соответственно в точках A и B. При этом подвижная платформа длиной l_P (м) создает погонную нагрузку q_P (Н/м) на ходовой винт, длина которого составляет l_V, м.

Для схемы, изображенной на рисунке 1а, согласно рекомендациям, приведенным в источнике [12], максимальный изгибающий момент в поперечном сечении ходового винта составит

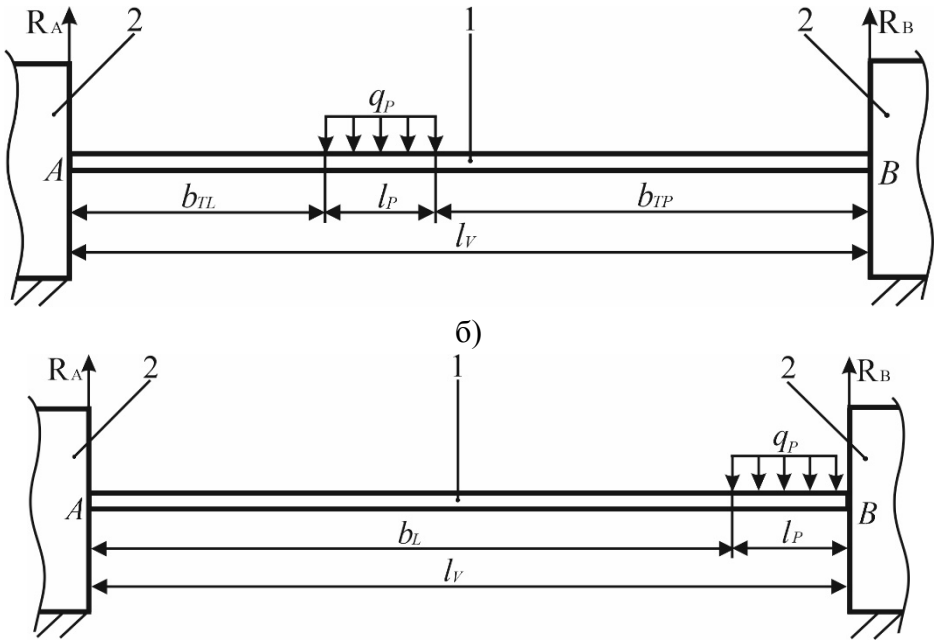
$$M_{\max PP} = \frac{q_P l_P^2}{8}\left(2 - \frac{l_P}{l_V}\right)^2. \qquad (2)$$

В отношении схемы, изображенной на рисунке 1б, с учетом рекомендаций, представленных в источнике [12], максимальный изгибающий момент в поперечном сечении ходового винта будет равен

$$M_{\max VP} = q_P l_P \frac{2b_{TP} + l_P}{2l_V}\left[b_{TL} + \frac{l_P\left(2b_{TP} + l_P\right)}{4l_V}\right]. \qquad (3)$$



а)



1 – ходовой винт; 2 – опорная тележка

а – первая позиция; б – вторая позиция; в – третья позиция

Рисунок 1 – Схемы нагружения ходового винта

При этом согласно схеме, изображенной на рисунке 1в, с учетом рекомендаций [12], максимальный изгибающий момент в поперечном сечении ходового винта определяется выражением

$$M_{\max TP} = \frac{q_P l_P^2}{8}\left(2 - \frac{l_P}{l_V}\right)^2. \quad (4)$$

Так как $M_{\max PP} = M_{\max TP}$, то обуславливаемся, что итоговый максимальный изгибающий момент в поперечном сечении ходового винта для первой и третьей позиций робота в теплице соответствует следующему равенству

$$M_{\max IP} = M_{\max PP} = M_{\max TP}. \quad (5)$$

В зависимостях (2), (3) и (4) погонная нагрузка, действующая на ходовой винт, рассчитывается по формуле

$$q_P = \frac{\left(m_{PP} + m_{TZ} + m_{OZ}\right)g}{l_P} = \frac{m_R g}{l_P}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2;

m_{PP} – масса подвижной платформы, кг;

m_{TZ} – масса телескопической штанги с захватывающим устройством, кг;

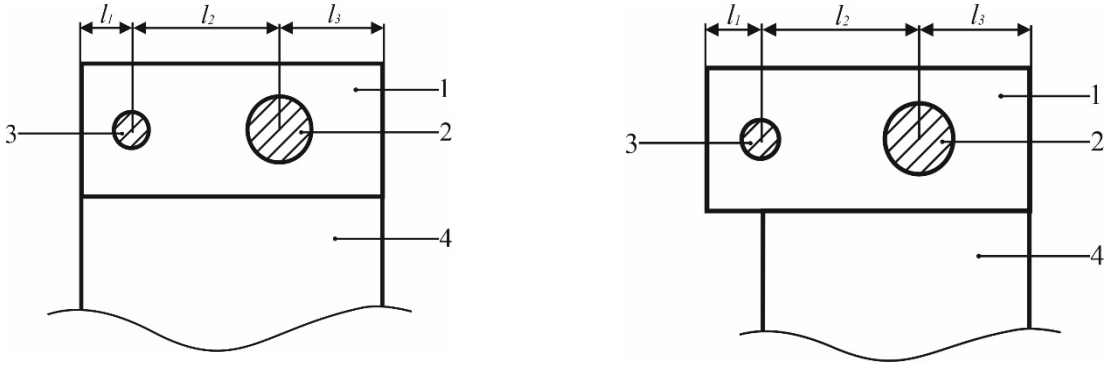
m_{OS} – масса объекта захвата, кг;

m_R – расчетная масса, кг.

Согласно описанию роботизированной теплицы, представленному в работах [3, 4], подвижная платформа опирается на ходовой винт и на ограничитель. Отсюда следует, что суммарная масса подвижной платформы, телескопической штанги с захватывающим устройством и объекта захвата полностью не воздействует на ходовой винт, так как определенную часть воспринимает ограничитель. Долевое распределение воздействия

указанной массы на ходовой вин зависит от ряда факторов, основными из которых являются способ крепления телескопической штанги к подвижной платформе и расстояние между центрами ходового винта и ограничителя.

На рисунке 2 показано наиболее рациональное крепление телескопической штанги к подвижной платформе.



а) б)

1 – подвижная платформа; 2 – ходовой винт; 3 – ограничитель;
4 – телескопическая штанга
а – на всю ширину подвижной платформы;
б – частичное перекрытие ширины подвижной платформы

Рисунок 2 – Схемы крепления телескопической штанги к подвижной платформе

В соответствии со схемой, изображенной на рисунке 2а, расчетная масса, воздействующая на ходовой винт, составит

$$m_R = \left(m_{PP} + m_{TZ} + m_{OZ}\right)\left[\frac{0,5l_2 + l_3}{l_1 + l_2 + l_3}\right], \tag{7}$$

где l_1 – расстояние от ближнего края подвижной платформы до центра ограничителя, м;

l_2 – расстояние между центрами ограничителя и ходового винта, м;

l_3 – расстояние от ближнего края подвижной платформы до центра ходового винта, м.

Для схемы, приведенной на рисунке 2б, расчетная масса, воздействующая на ходовой винт, определяется следующим образом

$$m_R = m_{PP}\left[\frac{0,5l_2 + l_3}{l_1 + l_2 + l_3}\right] + \left(m_{TZ} + m_{OZ}\right)\left[\frac{0,5l_2 + l_3}{l_2 + l_3}\right]. \tag{8}$$

В равенстве (1) $M_{\text{СХВ}} = M_{\max IP}$ при условии $M_{\max IP} \geq M_{\max VP}$, если $M_{\max IP} < M_{\max VP}$, то $M_{\text{СХВ}} = M_{\max VP}$.

Крутящий момент в сечении ходового винта, с учетом рекомендаций [11], определяется из выражения

$$M_{\text{КХВ}} = \frac{N_{SD}}{\omega_{SD}}, \tag{9}$$

где N_{SD} – мощность серводвигателя, Вт;

ω_{SD} – угловая скорость серводвигателя, рад/с.

Учитывая равенство (1) и применив методику обоснования параметров специального пути для перемещения робота в теплице [4], запишем конечную формулу для расчета

минимально допустимого диаметра ходового винта

$$d_{\text{minХВ}} = \sqrt[3]{\frac{32\left[k_{\text{ЗИХВ}}\right]M_{\max\text{ПХВ}}}{\pi\sigma_{\text{ИХВ}}k_{\text{ПИХВ}}}}, \quad (10)$$

где π – число «пи», постоянная величина примерно равная 3,14;

$\left[k_{\text{ЗИХВ}}\right]$ – коэффициент запаса прочности при изгибе и кручении ходового винта, равный 2,0…3,0 [4, 8, 9];

$\sigma_{\text{ИХВ}}$ – предельно допустимое напряжение при изгибе ходового винта, Па;

$k_{\text{ПИХВ}}$ – коэффициент понижения расчетного напряжения при возникновении неравномерности распределения нагрузок в ходовом винте и из-за наличия в нем резьбы, равный 0,8 [4].

Вывод. Разработанная методика обоснования параметров ходового винта позволит точно рассчитать минимально допустимый его диаметр, так как учитывает одновременное воздействие изгибающего и крутящего моментов, что дает возможность обеспечить надежное перемещение автономного робота по территории теплицы при выполнении установленных функций.

Список использованных источников

1. Pedro Ponce, Arturo Molina, Paul Cepeda, Esther Lugo, Brian MacCleery. Greenhouse design and control. CRC Press, 2011. 380 p.

2. Patent 216492052 U CN, Int. Cl. A01D 45/00, 45/26, 45/28. Automatic harvesting equipment for crops in greenhouse / Gao Mingxing, Xu Biao (CN). Patent holder SHANGHAI YINAVIGATION SEA CORE AGRICULTURAL SCIENCE AND TECH LIMITED COMPANY (CN). № 202122648582.2; filed: 01.11.2021; date application 13.05.2022. 8 p.

3. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Усовершенствованная роботизированная теплица // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 6 июня 2024 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. С. 82–87.

4. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Обоснование параметров специального пути для перемещения робота в теплице // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. № 1(84). С. 70–83. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_1_70.

5. Патент 2818343 РФ, МПК A 01 G 9/00. Роботизированная теплица / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2023127402; заявл. 25.10.2023; опубл. 02.05.2024, бюл. № 13. 8 с.

6. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Роботизированная теплица для вертикального земледелия // Проблемы и перспективы развития энергетики, робототехники и электротехнологий: материалы национальной научно-практической конференции с международным участием; г. Саратов, декабрь 2024 г. Саратов: ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2025. С. 53–60.

7. Патент 2830888 РФ, МПК A 01 G 9/14. Роботизированная теплица / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2024124576; заявл. 23.08.2024; опубл. 26.11.2024, бюл. № 33. 15 с.

8. Любошиц М.И., Ицкович Г.М. Справочник по сопротивлению материалов: 2-е изд. перераб. и доп. // Минск: «Высшая школа», 1969. 464 с.

9. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению

материалов. Киев: Издательство «Наукова Думка», 1975. 704 с.

10. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов: 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Будивельник, 1982. 280 с.

11. Белявский С.М. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов. М.: Высшая школа, 1967. 380 с.

12. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов: 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.

Bibliography

1. Pedro Ponce, Arturo Molina, Paul Cepeda, Esther Lugo, Brian MacCleery. Greenhouse design and control. CRC Press, 2011. 380 p.

2. Patent 216492052 U CN, Int. Cl. A01D 45/00, 45/26, 45/28. Automatic harvesting equipment for crops in greenhouse / Gao Mingxing, Xu Biao (CN). Patent holder SHANGHAI YINAVIGATION SEA CORE AGRICULTURAL SCIENCE AND TECH LIMITED COMPANY (CN). № 202122648582.2; filed: 01.11.2021; date application 13.05.2022. 8 p.

3. Vasilyev V.V., Afonichev D.N. Improved Robotic Greenhouse // Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; Voronezh, June 6, 2024. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2024. Pp. 82–87.

4. Vasilyev V.V., Afonichev D.N. Justification of the Parameters of a Special Path for Moving a Robot in a Greenhouse // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2025. No. 1(84). Pp. 70–83. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_1_70.

5. Patent 2818343 of the Russian Federation, IPC A 01 G 9/00. Robotic greenhouse / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev; applicant and patent holder of the Voronezh State Agrarian University. No. 2023127402; applied on October 25, 2023; published on May 2, 2024, Bulletin No. 13. 8 p.

6. Vasilyev V.V., Afonichev D.N. Robotic greenhouse for vertical farming // Problems and prospects of development of energy, robotics and electrical engineering: materials of the national scientific and practical conference with international participation; Saratov, December 2024. Saratov: FGBOU VO Vavilovsky University, 2025. Pp. 53–60.

7. Patent 2830888 of the Russian Federation, IPC A 01 G 9/14. Robotic greenhouse / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev; applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Agrarian University. No. 2024124576; applied on 23.08.2024; published on 26.11.2024, Bulletin No. 33. 15 p.

8. Lyuboshits M.I., Itskovich G.M. Handbook on Resistance of Materials: 2nd edition, revised and expanded. Minsk: Vysshaya Shkola, 1969. 464 p.

9. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveyev V.V. Handbook on Strength of Materials. Kiev: Naukova Dumka Publishing House, 1975. 704 p.

10. Fesik S.P. Handbook of resistance of materials: 2nd ed., revised. and add. Kiev: Budivelnik Publ., 1982. 280 p.

11. Belyavsky S.M. A guide to solving problems in the resistance of materials. Moscow: Higher School, 1967. 380 p.

12. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook of Material Resistance: 2nd ed., revised. and add. Kiev: Nauk. Dumka, 1988. 736 p.

Владимир Викторович Васильев, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ,
394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1, e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru

CALCULATION OF THE DIAMETER OF THE DRIVE SCREW INTENDED FOR MOVING THE ROBOT IN THE GREENHOUSE

V.V. Vasiliev[1]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Abstract. To accurately perform all operations by an autonomous robot in a greenhouse, it is necessary to correctly determine the diameter of the lead screw. This article presents a method for calculating the diameter of the lead screw, which takes into account the simultaneous effects of bending and torque on the lead screw. When the lead screw is subjected to bending torque, it is necessary to consider the percentage distribution of the autonomous robot's mass on the limiter and the lead screw, as well as the method of attaching the telescopic rod to the moving platform and the positioning of the autonomous robot relative to the support trolleys. When the bending moment is applied to the lead screw, the power of the servo motor and its angular velocity, as well as the material of the lead screw, are taken into account.

Key words: robotic greenhouse, robot, support trolley, lead screw, diameter, torque, bending moment.

Vladimir Viktorovich Vasiliev, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State *Agrarian University named after Emperor Peter the Great,*
394087, Voronezh, Michurina Street, 1, e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru

УДК 636.2.034:004.9:620.9

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ВЕТЕРИНАРНОГО КОНТРОЛЯ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МОЛОКА

Д.Д. Слимаков, И.И. Гируцкий

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Аннотация. *В работе теоретически обосновано внедрение роботизированных систем бесконтактного мониторинга здоровья крупного рогатого скота для повышения энергетической эффективности производства молока. В качестве методов исследования использовалось математическое моделирование структуры энергетических потерь и анализ термограмм. Предложена архитектура автоматизированной системы на базе инфракрасной термографии и сверточных нейронных сетей, интегрированная в систему управления стадом. Установлено, что субклиническая стадия мастита, выявляемая традиционными методами лишь на 5–7 день, ведет к скрытому росту удельной энергоемкости продукции из-за снижения удоя при сохранении затрат на содержание. Расчеты подтверждают, что переход к цифровому мониторингу позволяет диагностировать патологию на раннем этапе (2–3 день) по градиенту температур ($\Delta T > 1{,}0°C$). Это позволяет реализовать стратегию «управления по отклонениям», предотвратить выбраковку молока и удержать показатели энергоэффективности в пределах нормы, минимизируя нецелевой расход ресурсов фермы.*

Ключевые слова: *энергосбережение, мастит, инфракрасная термография, цифровая ферма, удельная энергоемкость, нейронные сети, автоматизация.*

Введение. В контексте стратегического развития агропромышленного комплекса, которое базируется на принципах энергетической эффективности, вопросы оптимизации ресурсопотребления приобретают первостепенное значение. Современное животноводство характеризуется высокой степенью энергоемкости, где эффективность использования ресурсов определяется не только КПД оборудования, но и биологическим статусом животных.

Наибольший экономический и энергетический ущерб молочному животноводству наносит мастит. Согласно современным исследованиям, убытки формируются не только за счет прямых затрат на ветеринарные препараты, но и вследствие снижения валового надоя [8]. При этом часто игнорируется энергетический аспект проблемы: постоянные затраты энергии фермы (корма, электроэнергия на вентиляцию, освещение, водоподготовку), направленные на содержание больного животного, не конвертируются в товарную продукцию. Это ведет к росту удельной энергоемкости единицы молока [3].

Традиционные методы диагностики (клинический осмотр, пальпация, калифорнийский тест) трудоемки и субъективны. Они не позволяют проводить ежедневный скрининг всего поголовья в поточном режиме, что приводит к пропускам ранних стадий заболевания [6, 12].

Цель работы заключается в обосновании применения цифровых систем бесконтактной термографической диагностики как эффективного инструмента для снижения удельной энергоемкости производства молока [2].

Материалы и методы исследования.

В качестве основного метода исследования рассматривается инфракрасная термография (ИКТ). Метод базируется на регистрации собственного теплового излучения поверхности вымени, где локальная гипертермия служит индикатором воспаления [7].

Для реализации автоматизированного контроля нами разработана структурно-функциональная схема системы (рисунок 1). Технология предполагает интеграцию оборудования непосредственно в поточную линию движения животных, что обеспечивает непрерывный мониторинг без стресса для поголовья [4].

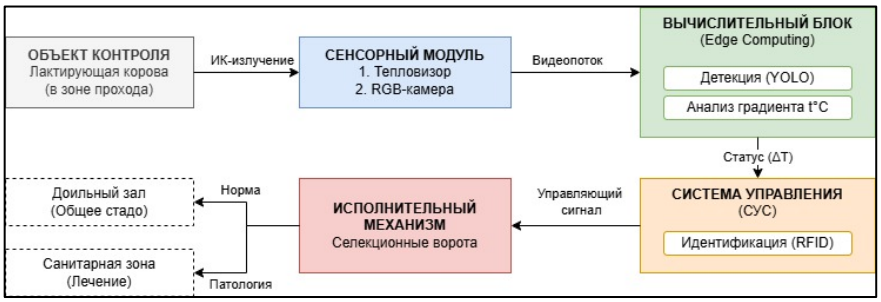


Рисунок 1 - Структурно-функциональная схема системы цифрового мониторинга.

Аппаратная часть комплекса включает синхронизированную пару сенсоров (тепловизионная матрица LWIR и RGB-камера) [5]. Программная реализация алгоритма обработки данных выполнена на языке Python. Ключевым этапом является извлечение радиометрических данных из термограмм. Для этого в разработанном ПО используется библиотека ExifTool, позволяющая декодировать метаданные производителя тепловизоров и преобразовывать их в числовую матрицу температур. Далее применяется алгоритм нейросетевой детекции (архитектура YOLO) для выделения зоны интереса (вымени) и исключения тепловых шумов фона. Критерием диагностики является градиент температур (ΔT>1,0°C) между симметричными долями.

Разработанный алгоритм позволяет минимизировать эти потери за счет ранней диагностики:

1. Обнаружение области интереса (ROI). Сверточные нейронные сети (например, архитектуры U-Net или YOLO) позволяют с высокой точностью выделить область вымени на изображении, отсекая тепловые шумы от конечностей и окружающей среды [13].

2. Термометрический анализ. Система анализирует градиент температур. Установлено, что разница температур между симметричными долями вымени ΔT более 1,0–1,5 °C является надежным индикатором патологии [10, 11].

3. Принятие решения. Использование статистических методов (например, критерия Байеса) позволяет минимизировать ошибки ложной тревоги [1, 9].

Результаты и обсуждение.

Энергетическая эффективность производства молока напрямую зависит от здоровья стада. Удельную энергоемкость продукции ($E_{уд}$) можно выразить зависимостью:

$$E_{уд} = \frac{W_{\Sigma}}{V_{молока}}$$

Где W_{Σ}– суммарные энергозатраты на содержание и обслуживание животного; $V_{молока}$ – объем качественного товарного молока.

При возникновении субклинического мастита происходят процессы, негативно влияющие на эту пропорцию. Воспаление вызывает снижение секреторной деятельности, уменьшая $V_{молока}$, в то время как затраты энергии W_{Σ} (особенно кормовая база и

микроклимат) остаются неизменными. Более того, при переходе в клиническую стадию молоко подлежит утилизации, что делает энергетический КПД процесса отрицательным [3, 8].

Нами была построена расчетная модель изменения данного показателя для двух сценариев:

1. Традиционный контроль: Обнаружение мастита происходит визуально на стадии клинических признаков (5–7 день). К этому моменту секреция молока падает, а при начале лечения антибиотиками все молоко утилизируется, что ведет к резкому скачку энергоемкости.

2. Цифровой мониторинг: Обнаружение происходит на стадии субклиники (2-3 день) по тепловому следу. Раннее вмешательство позволяет сохранить продуктивность.

Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 2.

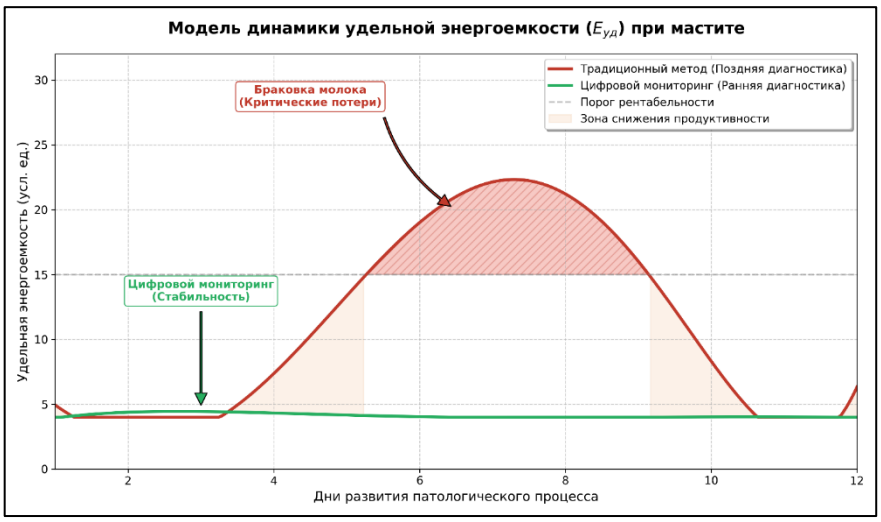


Рисунок 2 - Расчетная динамика удельной энергоемкости производства молока.

Анализ полученных кривых демонстрирует принципиальную разницу в эффективности подходов:

1. Зона критических потерь (область со штриховкой): На графике выделена зона, где удельная энергоемкость традиционного метода (красная линия) превышает пороговое значение рентабельности (*Е*уд > 15). Эта зона соответствует периоду клинического течения болезни и лечения антибиотиками, когда молоко подлежит утилизации (браковке). В этот период все энергетические затраты фермы на содержание животного являются прямым убытком.

2. Зона снижения продуктивности (область заливки): Пространство между графиками ниже порога браковки отражает потери на субклинической стадии. Хотя молоко еще поступает в переработку, его объем снижен, что повышает энергоемкость каждого литра.

3. Эффект стабилизации: Использование цифрового мониторинга (зеленая линия) позволяет купировать развитие патологии на раннем этапе (день 3), удерживая показатели энергоэффективности в пределах нормы и не допуская входа системы в зону критических потерь.

Выводы.

Проведенное теоретическое обоснование подтверждает, что цифровая трансформация ветеринарного контроля является действенным инженерным инструментом энергосбережения. Внедрение автоматизированных систем термографии позволяет перейти

от реактивного лечения к проактивному управлению, что обеспечивает снижение удельной энергоемкости производства за счет минимизации потерь продукции.

Список использованных источников:

1. Гируцкий И.И., Сеньков А.Г., Ракевич Ю.А. Статистический алгоритм обработки термографических снимков вымени коровы для диагностики мастита с использованием критерия Байеса // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 1. – С. 42-46.

2. Колчина А.Ф., Липчинская А.К. Перспективы применения инфракрасной термографии в исследовании молочной железы коров // Аграрный вестник Урала. – 2010. – № 9(75). – С. 94-97.

3. Колчина А.Ф., Баркова А.С. Современные методы в диагностике патологии молочной железы высокопродуктивных коров // Аграрный вестник Урала. – 2012. – № 12 (104). – С. 32-34.

4. Ракевич Ю. А. Технология и средства для бесконтактной идентификации мастита коров термографическим методом в условиях поточного производства молока // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – Т. 63, № 1. – С. 68–79.

5. Юрочка С.С., Павкин Д.Ю., Пехальский И.А. [и др.] Технология бесконтактной оценки физиологического состояния вымени для ранней диагностики заболеваний // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2023. – № 5. – С. 83-88.

6. Berry R.J., Kennedy A.D., Scott S.L., Kyle B.L., Schaefer A.L. Daily variation in the udder surface temperature of dairy cows measured by infrared thermography: potential for mastitis detection // Canadian Journal of Animal Science. – 2003. - Vol. 83, № 4. – P. 687-693.

7. Digiovani D.B., Borges M.H.F., Galdioli V.H.G. [et al.] Infrared thermography as diagnostic tool for bovine subclinical mastitis detection // Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal. – 2016, - Vol. 10, № 4. – P. 685-692.

8. Fonseca M.E.B., Mourão A.M., Chagas J.D.R. [et al.] Bovine mastitis: review // PUBVET. – 2021. - Vol. 15, № 2.

9. Hirutski I., Rakevich Y.A., Senkov A.G. Selection of the information parameter for the thermography method of diagnostics of dairy cows mastitis // International scientific journal «Mechanization in agriculture & conserving of the resources. – Bulgaria, 2021. – pp. 14–18.

10. Ribeiro I.P., Gonçalves P.H.D., Rodrigues M.S. [et al.] Infrared thermography for detection of clinical and subclinical mastitis in dairy cattle: comparison between Girolando and Jersey breeds // Ciência Animal Brasileira. – 2023. - Vol. 24.

11. Velasco-Bolaños J., Ceballes-Serrano C.C., Velásquez-Mejía D. [et al.] Application of udder surface temperature by infrared thermography for diagnosis of subclinical mastitis in Holstein cows located in tropical highlands // Journal of Dairy Science. - 2021. - Vol. 104, № 9. – P. 10310-10323.

12. Zaninelli M., Redaelli V., Luzi F. [et al.] First evaluation of infrared thermography as a tool for the monitoring of udder health status in farms of dairy cows // Sensors. – 2018. - Vol. 18, № 3. – P. 862.

13. Zhang Q., Yang Y., Liu G., Ning Y.-L., Li J.-Q. Dairy cow mastitis detection by thermal infrared images based on CLE-UNet // Animals. – 2023. - Vol. 13, № 13. - P. 2211.

Bibliography:

1. Hirutski I.I., Senkov A.G., Rakevich Y.A. Statistical algorithm for processing thermographic images of a cow's udder for diagnosing mastitis using the Bayesian criterion //

System analysis and applied informatics. 2023. No. 1. pp. 42-46.

2. Kolchina A.F., Lipchinskaya A.K. Prospects for the use of infrared thermography in the study of the mammary gland of cows // Agrarian Bulletin of the Urals. 2010. No. 9 (75). pp. 94-97.

3. Kolchina A.F., Barkova A.S. Modern methods in the diagnosis of breast pathology in highly productive cows // Agrarian Bulletin of the Urals. 2012. No. 12 (104). pp. 32-34.

4. Rakevich Y.A. Technology and means for contactless identification of cow mastitis by thermographic method in conditions of continuous milk production // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Science Series. 2025. Vol. 63, No. 1. pp. 68–79.

5. Yurochka S.S., Pavkin D.Yu., Pekhalsky I.A. [et al.]. Technology of contactless assessment of the physiological state of the udder for early diagnosis of diseases // Bulletin of the Russian Agricultural Science. 2023. No. 5. pp. 83-88.

6. Berry R.J., Kennedy A.D., Scott S.L., Kyle B.L., Schaefer A.L. Daily variation in the udder surface temperature of dairy cows measured by infrared thermography: potential for mastitis detection // Canadian Journal of Animal Science. – 2003. - Vol. 83, № 4. – P. 687-693.

7. Digiovani D.B., Borges M.H.F., Galdioli V.H.G. [et al.] Infrared thermography as diagnostic tool for bovine subclinical mastitis detection // Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal. – 2016, - Vol. 10, № 4. – P. 685-692.

8. Fonseca M.E.B., Mourão A.M., Chagas J.D.R. [et al.] Bovine mastitis: review // PUBVET. – 2021. - Vol. 15, № 2.

9. Hirutski I., Rakevich Y.A., Senkov A.G. Selection of the information parameter for the thermography method of diagnostics of dairy cows mastitis // International scientific journal «Mechanization in agriculture & conserving of the resources. – Bulgaria, 2021. – pp. 14–18.

10. Ribeiro I.P., Gonçalves P.H.D., Rodrigues M.S. [et al.] Infrared thermography for detection of clinical and subclinical mastitis in dairy cattle: comparison between Girolando and Jersey breeds // Ciência Animal Brasileira. – 2023. - Vol. 24.

11. Velasco-Bolaños J., Ceballes-Serrano C.C., Velásquez-Mejía D. [et al.] Application of udder surface temperature by infrared thermography for diagnosis of subclinical mastitis in Holstein cows located in tropical highlands // Journal of Dairy Science. - 2021. - Vol. 104, № 9. – P. 10310-10323.

12. Zaninelli M., Redaelli V., Luzi F. [et al.] First evaluation of infrared thermography as a tool for the monitoring of udder health status in farms of dairy cows // Sensors. – 2018. - Vol. 18, № 3. – P. 862.

13. Zhang Q., Yang Y., Liu G., Ning Y.-L., Li J.-Q. Dairy cow mastitis detection by thermal infrared images based on CLE-UNet // Animals. – 2023. - Vol. 13, № 13. - P. 2211.

Денис Дмитриевич Слимаков, аспирант 2 курса направления подготовки 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)», УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», dslimakov@yandex.by

Иван Иванович Гируцкий, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных систем управления производством, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», gir_50@mail.ru

DIGITAL TRANSFORMATION OF VETERINARY CONTROL AS A FACTOR IN REDUCING THE ENERGY INTENSITY OF MILK PRODUCTION

D.D. Slimakov, I.I. Hirutski

Belarusian State Agrarian Technical University

Annotation. The paper substantiates the introduction of robotic contactless cattle health monitoring to enhance milk production energy efficiency. Research methods included mathematical modeling of energy losses and thermogram analysis. An automated system architecture based on infrared thermography and convolutional neural networks integrated into herd management is proposed. It was found that subclinical mastitis, typically detected on days 5–7, increases specific energy intensity due to lower yields with constant costs. Transitioning to digital monitoring enables early diagnosis (days 2–3) via temperature gradients ($\Delta T > 1.0°C$). This supports a «management by deviation» strategy, preventing milk rejection and keeping energy efficiency within normal ranges by minimizing resource waste.

Keywords: energy saving, mastitis, infrared thermography, digital farm, specific energy intensity, neural networks, automation.

Denis Dmitrievich Slimakov, 2nd year postgraduate student of the training direction 05.13.06 «Automation and Control of Technological Processes and Production (by industry)», Belarusian State Agrarian Technical University, dslimakov@yandex.by

Ivan Ivanovich Hirutski, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automated Production Management Systems, Belarusian State Agrarian Technical University, gir_50@mail.ru

УДК 637.073

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ МАЙОНЕЗНОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

В.В. Демичев, В.Н. Андреев, С.А. Бредихин

ФГБОУ-ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

Аннотация: *В работе предложен новый метод для количественного и качественного анализа дисперсности майонезной эмульсии с помощью компьютерного зрения. Определение жировых шариков на изображении как объекта и подсчёта площади осуществляется с помощью библиотеки YOLO (You Only Look Once) и заранее обученной пользовательской модели. Пользовательская модель составлялась на базе предварительно обученной модели yolov8n-seg. Перед ранжированием жировых шариков для корректной работы программы необходимо сделать фото с микроскопа с наложенным образцовым стеклом с ценой деления не менее 10 мкм, что позволит получить действительные размеры жировых шариков Ранжирование жировых шариков осуществляется с помощью интервальных вариационных рядов и гистограммы частот, уже прописанных в программу. Разработанное программа позволяет в экспресс формате определить качество дисперсной фазы майонезной эмульсии, а также при достаточном обучении пользовательской модели позволит определять дисперсность водно-жировых эмульсий.*

Ключевые слова: *дисперсность эмульсии, программа для ЭВМ, YOLO, интервальные вариационные ряды.*

Введение. Майонез один из наиболее популярных продуктов, использующийся во многих блюдах в качестве заправки. Поскольку продукт популярен не только в нашей стране, но и в ряде других стран исследование свойств майонезной продукции необходимо, так же, как и системные исследования майонеза [1,2].

Одним из основных показателей майонезной эмульсии является ее дисперсность и жирность майонезной продукции. В настоящее время существует ряд стандартных методов определения дисперсности майонезной эмульсии, однако данные методы имею ряд своих недостатков таких как точность метода, влияние внешних факторов на процесс измерения дисперсности майонезной эмульсии и другие.

Материалы и методы. Исходя из этого существует необходимость создать новый точный метод определения дисперсности майонезной эмульсии, не зависящий от внешних факторов и наблюдателя. В основе нового метода лежит компьютерное зрение, в основе которого лежит алгоритм You Only Look Once (YOLO)[3,4,5]. Для нормальной работы нового алгоритма необходимо произвести ряд подготовительных этапов, а именно:

- Сделать не менее чем 2000-3000 тысяч изображений с объектом, который будет искать алгоритм. Поскольку на снимке с микроскопа жировых шариков майонеза достаточно много, то ориентировочное количество снимков с микроскопа будет варьироваться от 2 до 5;
- После получения снимков необходимо произвести аннотирование изображений

(рисунок 1). Аннотирование изображений проводится с помощью VGG image annotator. По своей сути аннотирование является указанием для нейросети, где на изображении находится искомый объект.

- После аннотирования изображений необходимо произвести дообучение заранее обученной модели. Поскольку 8 версии алгоритма предварительно обученных моделей 5, необходимо определить наиболее оптимальный вариант из данных моделей. Наиболее подходящей по все параметрам является yolov8n-seg. После подбора модели, происходит ее обучение на искомом объекте с разным количеством эпох [6].

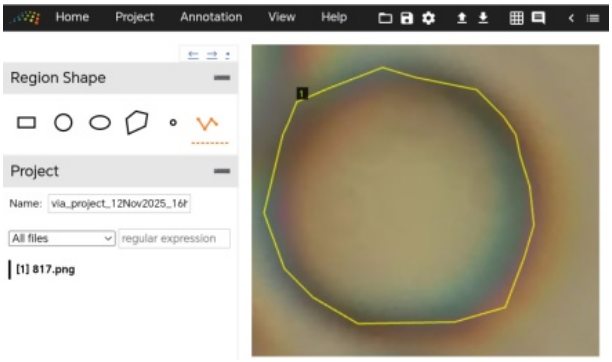


Рисунок 1 - Аннотирование изображений жировых шариков

Для дальнейшей обработки полученных площадей жировых шариков майонеза применяется следующая методика, уже вшитая в программу:

Программа в автоматическом режиме составляет ряд данных, в нашем случае площади всех жировых шариков. После этого рассчитывается размах вариации (длинна общего интервала) как максимальное значение ряда минус минимальное значение ряда. Разбиение на частичные интервалы происходит с помощью формулы Стерджиса (1).

$$k = 1 + 3{,}3221\lg(n) \quad 1)$$

где n - объем выборки (количество все жировых шариков).

Соответственно если количество интервалов вычисленное по формуле 1 получилось дробное, то его необходимо округлить до целого числа в большую сторону.

Поскольку длинны частичных интервалов число не постоянное, то применяют равно интервальную группировку. Равно интервальная группировка вычисляется как разность максимального и минимального значения ряда деленое на количество интервалов (2).

$$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{k} \quad 2)$$

где x_{max} – максимальное значение ряда, x_{min} – минимальное значение ряда

После вычисления равно интервальной группировки рассчитывается нижняя граница первого интервала соответственно, как разность минимального значения ряда и половины равно интервальной группировки как показано в феруле (3).

$$x_{hi} = x_{min} - \frac{1}{2}h_i \quad 3)$$

где x_{hi}- нижняя граница первого интервала,h_i – половина равно интервальной группировки.

Соответственно вариационный ряд будет начинается с x_{hi} с шагом h_i. Шаг будет прибавляется до тех пор, пока не превысит значение максимального значения ряда.

После расчета параметров вариационного ряда с помощью библиотеки Plotly строится гистограмма частот в автоматическом режиме.

Однако полученные данные и поморённая гистограмма частот носит сугубо относительный характер так как размер жировых шариков привязан к размеру изображения. Для решения данной проблемы необходимо:

1) При фотографировании жировых шариков наложить образцовое стекло с размеров ценой деления не менее 10 микрометров;

2) Внести доработку в программу по автоматическому или же ручному поиску размерных рисок на изображении;

3) Внести в автоматический пересчёт пиксельных размеров жировых шариков в микрометры.

Для корректной и хорошей работы программы наиболее целесообразно было использовать появившийся еще в 1991 году язык программировал Python поскольку данный язык программирования превосходно работает с файлами различных форматов и полной поддержке компьютерного зрения.

Результаты и их анализ. После проведения подготовительных этапов обученная модель подгружается в программу для ЭВМ. Однако совершенно необходимо определить при какой степени обучения модель будет работать с достаточной точностью. При использовании модели yolov8n-seg при разном количестве эпох обучения результаты будут иметь следующий вид, как показано на рисунке 2.

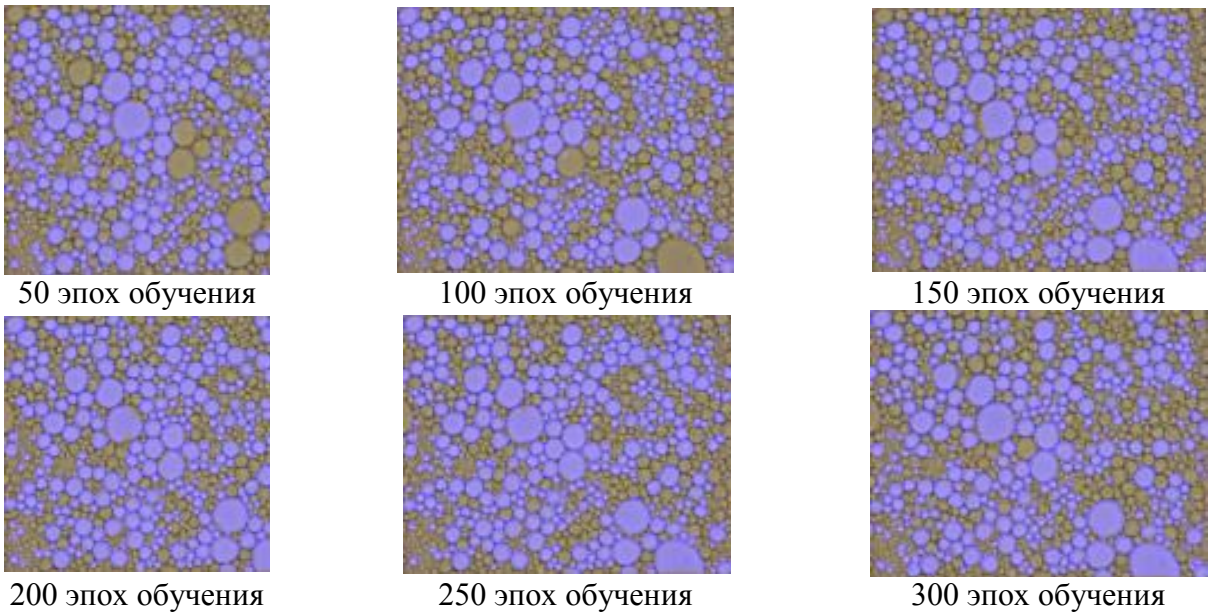
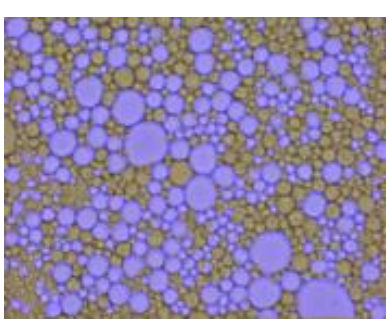
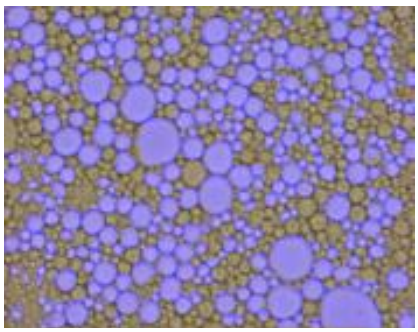


Рисунок 2 - Различное количество эпох обученности модели

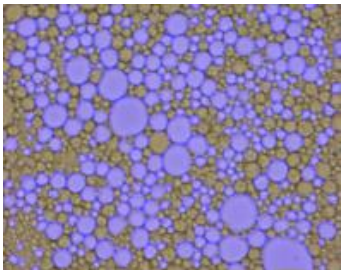
Однако использование текущего дата-сета и предварительно обученной модели yolov8n-seg недостаточно для полноценного использования поскольку практически нет отличий между 300, 500 и 700 эпохами обучения (рисунок 3.).



300 эпох



500 эпох



700 эпох

Рисунок 3. Высшие эпохи обученности модели

Выводы. Таким образом, для корректной работы программы для ЭВМ [7] необходимо дополнить или изменить аннотированный дата-сет из фотографий, а также сменить предварительно обученную модель на более мощную. В качестве новой предварительно обученной модели может выступать ряд моделей [8]:

- yolov8s - относится к классу небольших моделей, с баланса скорости и точности распознавания. Основными преимуществом является распознавание более мелких объектов, доступно больше классов для распознавания образов, работает быстрее на GPU по сравнению с предыдущей версией.
- yolov8m - относится к классу средних моделей по объёму. Основным преимуществом данной модели является большая точность по сравнению с предыдущими моделями. Однако данная модель требует больше ресурсов для обучения нежели предыдущие.
- yolov8x - относится к классу больших моделей. Основным преимуществом является самая высокая точность по сравнению с предшествующими моделями. Однако такая модель требует значительных ресурсов для обучения.

Стоит отметить, что дальнейший обсчет количества жировых шариков в настоящий момент не рационально так как обученная модель не обладает достаточной точностью.

Список использованных источников:

1. Демичев, В. В., Назарова, А. С., Мутовкина, Е. А. Системные исследования процесса производства майонезной продукции / В. В. Демичев, А. С. Назарова, Е. А. Мутовкина [Текст] // Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия-2023. - Москва: ООО "Сам Полиграфист", 2023. — С. 33-37.

2. Андреев В.Н., Демичев В.В., Клюшникова Е.О. Исследование линии производства майонеза методом системного анализа // Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики. — 2024. — С. 4-8.

3. Артемов, М. А. Машинное обучение: учебно-методическое пособие / М. А. Артемов, С. В. Золотарев, Е. С. Барановский. — Воронеж: ВГУ, 2021. — 22 с. — Текст: электронный//

Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/455024 (дата обращения: 11.12.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Цвенгер, И. Г. Машинное обучение в энергоснабжении: учебное пособие / И. Г. Цвенгер. — Казань: КНИТУ, 2024. — 112 с. — ISBN 978-5-7882-3489-2. — Текст: электронный// Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/477947 (дата обращения: 11.12.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Бредихин, С. А., Андреев, В. Н., Демичев, В. В., Мутовкина, Е. А., Журавлев, А. В. Моделирование процесса производства майонеза методом системного анализа и синтеза [Текст] / С. А. Бредихин, В. Н. Андреев, В. В. Демичев, Е. А. Мутовкина, А. В. Журавлев // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. — 2025. — № 2. — С. 206-212.

6. Высоцкий Р.Н., Демичев В.А. Синтезирование видео с помощью вариационного автоэнкодера и генеративно-состязательной модели // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. - 2024. - №11. - С. 51-55.

7. Демичев В.В., Бредихин С. А., Андреев В. Н., Карамнова С. А. Программа количественной и качественной оценки дисперсной фазы водно-жировых эмульсий [Текст] / Программа для ЭВМ свидетельство № 2025688976, 2025 - 5с.

8. Советов, П. Н. Программирование на языке Питон : учебное пособие / П. Н. Советов. — Москва : РТУ МИРЭА, 2021. — 105 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/226562 (дата обращения: 15.12.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Bibliography:

1. Demichev, V. V., Nazarova, A. S., Mutovkina, E. A. System studies of the production process of mayonnaise products / V. V. Demichev, A. S. Nazarova, E. A. Mutovkina [Text] // Safety and quality of agricultural raw materials and foodstuffs-2023. - Moscow: OOO "Sam Polygraphist", 2023. pp. 33-37.

2. Andreev V.N., Demichev V.V., Klyushnikova E.O. Investigation of the mayonnaise production line by the method of system analysis // Priorities of agro—industrial complex development in the context of digitalization and structural changes of the national economy. - 2024. — pp. 4-8.

3. Artyomov, M. A. Machine learning: an educational and methodical manual / M. A. Artyomov, S. V. Zolotarev, E. S. Baranovsky. — Voronezh: VSU, 2021. — 22 p. — Text: electronic// Lan: electronic library system. — URL: https://e.lanbook.com/book/455024 (date of request: 11.12.2025). — Access mode: for authorization. users.

4. Tsvenger, I. G. Machine learning in energy supply: a textbook / I. G. Tsvenger. Kazan: KNRTU, 2024. 112 p. ISBN 978-5-7882-3489-2. Text: electronic// Lan: electronic library system. — URL: https://e.lanbook.com/book/477947 (date of request: 11.12.2025). — Access mode: for authorization. users.

5. Bredikhin, S. A., Andreev, V. N., Demichev, V. V., Mutovkina, E. A., Zhuravlev, A.V. Modeling of the mayonnaise production process by the method of system analysis and synthesis [Text] / S. A. Bredikhin, V. N. Andreev, V. V. Demichev, E. A. Mutovkina, A.V. Zhuravlev // Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex – healthy food products. — 2025. — No. 2. — pp. 206-212.

6. Vysotsky R.N., Demichev V.A. Synthesizing video using a variational autoencoder and a generative-competitive model // Modern science: actual problems of theory and practice. Series: natural and technical sciences. - 2024. - No. 11. - pp. 51-55.

7. Demichev V.V., Bredikhin S. A., Andreev V. N., Karamnova S. A. Program for quantitative and qualitative assessment of the dispersed phase of water-fat emulsions [Text] / Computer program certificate No. 2025688976, 2025 - 5c.

8. Sovetov, P. N. Programming in Python : a textbook / P. N. Sovetov. — Moscow : RTU MIREA, 2021. — 105 p. — Text : electronic // Lan : electronic library system. — URL: https://e.lanbook.com/book/226562 (date of request: 12/15/2025). — Access mode: for authorization. users.

Демичев Владимир Васильевич, преподаватель технологического колледжа, ФГБОУ-ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева demi4ev.volodymyr@yandex.ru
Андреев Владимир Николаевич, преподаватель технологического колледжа, ФГБОУ-ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева v.andreev@rgau-msha.ru
Бредихин Сергей Алексеевич, профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ-ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева sbredihin_kpia@rgau-msha.ru

INVESTIGATION OF THE DISPERSION OF MAYONNAISE PRODUCTS USING A COMPUTER PROGRAM

V.V. Demichev, V.N. Andreev, S.A. Bredikhin
K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University

Abstract: The paper proposes a new method for quantitative and qualitative analysis of the dispersion of mayonnaise emulsion using computer vision. The fat balls in the image are determined as an object and the area is calculated using the YOLO library (You Only Look Once) and a pre-trained user model. The user model was compiled on the basis of a pre-trained yolov8n-seg model. Before ranking the fat balls, for the program to work correctly, it is necessary to take a photo from a microscope with a superimposed sample glass with a division price of at least 10 microns, which will allow you to obtain the actual size of the fat balls. Fat balls are ranked using interval series of variations and a histogram of frequencies already prescribed in the program. The developed program allows you to determine the quality of the dispersed phase of a mayonnaise emulsion in an express format, and with sufficient training of the user model, it will allow you to determine the dispersion of water-fat emulsions.

Keywords: emulsion dispersion, computer program, YOLO, interval variation series.

Demichev, Vladimir Vasilyevich, lecturer at the College of Technology, K.A. Timiryazev Russian State Agricultural Academy. demi4ev.volodymyr@yandex.ru
Andreev Vladimir Nikolaevich, lecturer at the Technological College, K.A. Timiryazev Russian State Pedagogical University-Moscow Agricultural Academy v.andreev@rgau-msha.ru
Bredikhin Sergey Alekseevich, Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries, K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University sbredihin_kpia@rgau-msha.ru

УДК347:621.31

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЕСОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ЕДИНИЦ АФРИКАНСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ НЕЙРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЛАНЕТАРНОЙ ПОДЗЕМНО-ПОДВОДНОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ НЕЙРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ ВЫСШЕЙ КАТЕГОРИИ НАДЕЖНОСТИ С ЧЕТЫРЬМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ДОЛГОСРОЧНУЮ ПЕРСПЕКТИВУ ДО 2530 ГОДА. КЛЮЧ К АФРИКЕ

Шарупич В.П.,
ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина»,
Шарупич П.В.,
ООО «Патент»
Шарупич С.В.,
НИПИ «Градоагроэкопром» ООО «Патент»
Шарупич Т.С.,
«Градоагроэкопром» ООО «Патент»
Шарупич С.С., НИПИ «Градоагроэкопром» ООО «Патент»
Гиамфи Ассале Эме Сезер,
ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина»

Аннотация. *Президент России В.В. Путин на саммите Россия-Африка заявил, что Россия будет укреплять сотрудничество со странами Африки, Азии и Латинской Америки в области энергетики, сельского хозяйства, промышленности, образования и культуры. Ключевым направлением являются 62 структурные единицы Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой энергосистемы планеты Земля высшей категории надежности. Научные исследования и строительство Африканской континентальной нейроэнергосистемы осуществляется в соответствии с планетарным научно-практическим направлением: «Типовая структурная единица смирительной рубашки человечества. Нейронная сеть армирования антивандальных динамико-биологических 746- фазных отраслевых роутеров - генераторов для подключения внутренних локальных сетей на 696 абонентов и внешних локальных сетей на 8 абонентов - электронных клеток-автоматов-квадрополисов поселений Святой крест, с расположением направляющих поселений в двух взаимно перпендикулярных направлениях и предназначенных для армирования сборных нейросетей и их монолитных участков – конструкций – регионов, федераций, Планеты на базе динамических биочипов, биоэлектронов – как механизм поддержания номинальных инженерно-биологических и психологических характеристик человека (ИБК), повышения эффективности управления и развития отрасли атомной энергетики Российской Федерации. Противоядерная, противоракетная, противобомбовая многоуровневая защита 8-го уровня. Образование, исследования, проектирование, производство, строительство, эксплуатация, финансирование. Технологии. ТК против ОПГ».*

1. Введение

1.1. Президент России В.В. Путин на саммите Россия-Африка заявил, что Россия будет

укреплять сотрудничество со странами Африки, Азии и Латинской Америки в области энергетики, сельского хозяйства, промышленности, образования и культуры [2].

1.2. Это борьба с голодом, болезнями, увеличение продолжительности жизни, повышение энерговооруженности, подготовка кадров для ключевых отраслей [1,3].

1.3. Ключевым направлением являются структурные единицы Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой энергосистемы планеты Земля высшей категории надежности. При этом особую важность представляют технико-экономические характеристики и весовые соотношения структурных единиц, 62 республиканских нейроэнергосистем.

1.4. Определение технико-экономических характеристик, весовых соотношений республиканских нейроэнергосистем Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой энергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии, связано с необходимостью разработки планетарной нейросети единой энергосистемы планеты Земля.

1.5. **Определение. Нейроэнергосистема** — это совокупность генерирующих, передающих и потребляющих систем, нейроэнергочипов (отраслевых роутеров-генераторов) **все элементы которых на планете могут быть включены в единую нейроэнергосистему**. В данной связи индивидуальность нужна лишь в роли некого реле (ствола), чтобы потоки энергий и информации не пересекались (не сталкивались). Искусственная нейроэнергосистема может успешно работать только в случае полного соответствия естественной нейроэнергосистеме планеты Земля (впервые в мировой практике).

2. Цель и задачи разработки планетарной нейросети единой нейроэнергосистемы планеты Земля.

2.1. Цель: разработка Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной единой нейроэнергосистемы планеты Земля.

2.2. Задачи: разработка технико-экономических характеристик и весовых соотношений структурных единиц, 62 республиканских нейроэнергосистем Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой энергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии [1,4].

2.3 Разработка методики определения технико-экономических характеристик и весовых соотношений 62 республиканских нейроэнергосистем Африканской континентальной нейроэнергосистемы планеты Земля [1].

3. Материалы и методы определения технико-экономических показателей и весовых соотношений республиканских нейроэнергосистем.

3.1. Методика определения технико-экономических показателей и весовых соотношений Африканской континентальной нейроэнергосистемы в составе 62 республиканских нейроэнергосистем принята согласно [1], разработанной впервые в мировой практике с учетом необходимых дополнений.

3.2. Генерируемая мощность 2,93 млн. нейроэнергочипов, роутеров-генераторов, электронных клеток – автоматов – поселений Святой крест оставляет 3809 ТВт.

3.3. Эта общая генерируемая мощность 2,93 миллионов нейроэнергочипов, роутеров-генераторов электронных клеток - автоматов - поселений Святой крест распределяется на 7 континентов Земли, в том числе на Африку.

3.4. Если 100% поверхности Земли занять нейроэнергочипами, роутерами-генераторами, электронными клетками – автоматами, поселениями Святой крест и ввести в эксплуатацию 10

млн. поселений, генерируемая мощность составит 13000 ТВт.

Определение технико-экономических показателей и весовых соотношений сводится к следующему.

3.5. Тождество. Совмещение Технологий.

Всепоглощающая свободная конкуренция приводит к снижению темпов развития человечества и как результату - конфликту. С целью устранения сложившейся ситуации предложен инструмент, позволяющий использовать свободную конкуренцию в объеме, не приводящем к снижению темпов развития человечества и конфликтам. Это выражается следующим тождеством:

$$\kappa_{СНД} \equiv 1 = 1, \quad (1.1)$$

$$\kappa_{СНД} = \kappa_С + \kappa_К \equiv 1, \quad 0 \le \kappa_С \le 1, \quad (1.2) \quad (1)$$

$$1 \quad 0 \le \kappa_К \le 1, \quad (1.3)$$

где: $к_{СНД}$ - коэффициент совместной (совмещенной) нейронной деятельности, отн. ед,;

$к_С$ - коэффициент совмещения, отн. ед.;

$к_К$ - коэффициент конкуренции, отн. ед.

При $к_С$ равном 1, а $к_К$ равном 0 достигается максимальная скорость развития человечества, при этом $к_{СНД}$ коэффициент совместной (совмещенной) нейронной деятельности равен 1.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Континентальные нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии. Весовые отношения.

4.1.1. Соотношение технико-экономических характеристик - весовых отношений 7 континентальных энергосистем планетарной подземно-подводной многоуровневой энергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии на долгосрочную перспективу до 2530 года приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Соотношение технико-экономических характеристик - весовых отношений 7 континентальных нейроэнергосистем планетарной подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии на долгосрочную перспективу до 2530 года

№ п/п	Континентальная нейроэнергосистема	Площадь, млн. км²	Весовой коэффиц. от площади суши, %	Количество квадрополисов СК, тыс. шт.	Континентальная мощность источников генерации, ТВт
1	2	3	4	5	6
1	Азия	43,4	29,14	843,75	1097,0
2	Африка	30,3	20,34	591,80	769,3
3	Северная Америка	24,71	16,59	482,62	627,4
4	Южная Америка	17,84	11,98	348,44	453,0
5	Антарктида	14,1	9,47	275,39	358,0
6	Европа	10	6,71	131,06	170,38
7	Австралия	7,66	5,14	100,39	130,51
Итого		148.01	99.37	2773.45	3605.59

4.1.2. Дальнейшее рассмотрение континентальных структурных единиц сводится к

анализу структурных единиц Африканской континентальной нейроэнергосистемы, структурных единиц республиканских нейроэнергосистем Африканской континентальной нейроэнергосистемы, структурных единиц региональных нейроэнергосистем, структурных единиц республиканских нейроэнергосистем, структурных единиц районных нейроэнергосистем, региональных нейроэнергосистем, структурных единиц муниципальных нейроэнергосистем подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии на долгосрочную перспективу до 2530 года. Ключ к Африке.

Для дальнейшего использования понятий «Ключ к Африке» и «Ключ к Кот д'Ивуару» приведено общее понятие территориальных ключей (нейроключей).

4.1.3. Определение. Территориальные ключи (нейроключи) - Понятие, подразумевающее нейроустройство для входа на полную или частичную территорию планеты Земля, в частности, Ключ (нейроключ) к континенту (континентальный нейроключ), ключ к федерации, республике, королевству (нейроключ государственный). Нейроключи, как правило, многоотраслевые, в данном случае, рассматривается энергетический нейроключ.

По количественному составу нейроключи подразделяются на:

4.1.3.1. Нейроключ планеты Земля 1шт.;

4.1.3.2. Континентальные нейроключи 7 шт.;

4.1.3.3. Республиканские, федеральные, королевские нейроключи 250 шт.

4.1.3.4. Окружные нейроключи республик, федераций, королевств по расчету;

4.1.3.5. Региональные нейроключи федеральных округов по расчету;

4.1.3.6.Районные (муниципальные, коммуные) нейроключи регионов по расчету;

4.1.3.7. Квадрополисные нейроключи районов (муниципалитетов, коммун) нейроключи по расчету.

4.1.4. Структурные единицы Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками показаны на рисунке 1.

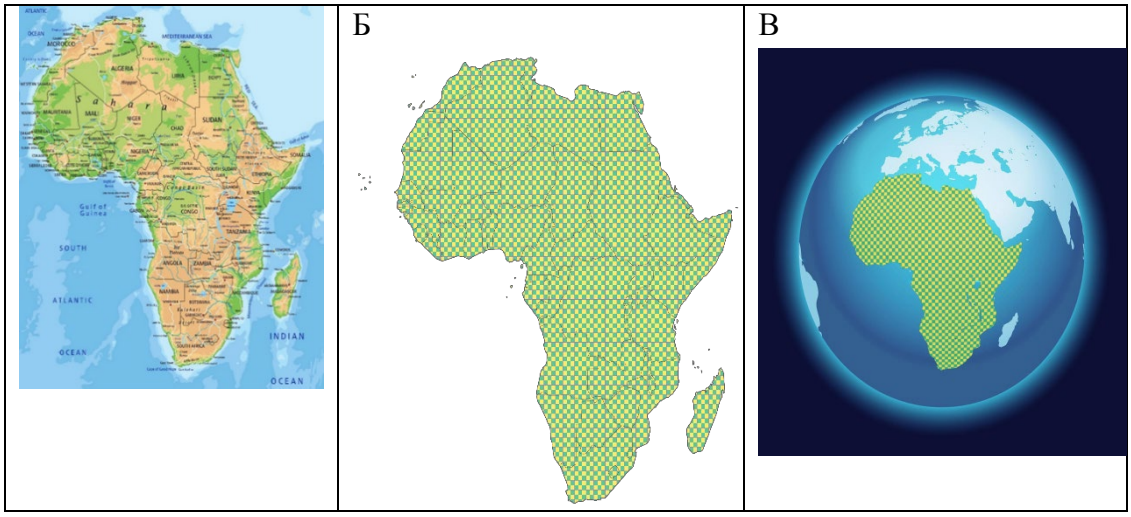


Рис. 1 - Структурные единицы Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии на долгосрочную перспективу до 2530 года. А – карта административного деления Африки; Б - Африканская континентальная нейроэнергосистема подземно-подводной многоуровневой

нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии на базе- электронных клеток-автоматов - квадрополисов поселений Святой крест, с расположением направляющих поселений в двух взаимно перпендикулярных направлениях и предназначенных для армирования сборных нейросетей и их монолитных участков – конструкций – регионов, на долгосрочную перспективу до 2530 года; В - Африканская континентальная нейроэнергосистема подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля.

4.1.5. Соотношение технико-экономических характеристик - весовых отношений 62 структурных единиц Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии на долгосрочную перспективу до 2530 года. Победа Африки над болезнями, ключ к Африке приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Соотношение технико-экономических характеристик - весовых отношений 62 структурных единиц Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии на долгосрочную перспективу до 2530 года. Победа Африки над болезнями. Ключ к Африке

№ п/п	Структурная единица Африканской континен-тальной нейроэнерго системы	Площадь км²	Весовой коэффициент, от площади Африки, %	Количество квадрополисов СК, тыс. шт.	Количество жителей на 2025 год, млн. чел	Количество жителей на 2530 год, млн. чел	Мощность источников генерации структурной единицы на период 2025 год, ГВт	Мощность текущих источников генерации на душу населения в 2025 году, кВт/ чел	Мощность текущих источников генерации на душу населения в 2530 году, кВт/чел..	Мощность источников генерации структурной единицы на долгосрочную перспективу до 2530 года, ТВт	Объём финансовых ресурсов на создание генерального плана структурной единицы США Африки на долгосрочную перспективу до 253(года, $ трлн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Алжир	2 381 740	7.92	46,52	45	139,56	24	0,53	433,5	60,47	1395,600
2	Амбазония	42 710	0.14	0,83	4	24,9	0,04	0,14	433,5	1,08	24.90
3	Ангола	1 246 700	4.15	24,35	33	73,05	5	0,15	433,5	31,65	30,500
4	Бенин	112 622	0.37	2,20	12	66	0.5	0,04	433,5	2,86	66,000
5	Ботсвана	581 726	1.93	11,36	2,4	34,08	2	0,83	433,5	14,77	340,800
6	Буркина-Фасо	274 000	0.91	5,35	22	60,5	0.6	0,02	433,5	6,96	160,500
7	Бурунди	27 830	0.09	0,54	12	62	0.4	0,03	433,3	0,71	16,200
8	Габон	267 668	0.89	5,23	2,3	15,69	1.5	0,65	433,4	6,80	56,900
9	Гамбия	10 380	0.03	0,20	2,5	6	0.1	0,04	433,3	0,26	6,000
10	Гана	238 534	0.79	4,66	34,12	139,8	5	0,14	433,5	6,06	139,800
11	Гвинея	245 857	0.81	4,82	13	14,46	1,2	0,09	433,6	6,27	144,600
12	Гвинея-Бисау	36 125	0.12	0,70	1,7	2,1	0,1	0,06	433,1	0,92	21,000
13	Демократическая Республика Конго	2 344 858	7.8	45,80	95	137,4	5	0,05	433,3	59,54	1374,000
14	Джибути	23 200	0.077	0,45	0,9	1,3	0,1	0,11	433,8	0,59	13,500
15	Египет	1 001 449	3.33	19,56	104	586,8	60	0,57	433,4	254,3	586,800
16	Замбия	752 614	2.5	14,70	19	44,10	2,3	0,12	433,3	19,11	441,000

17	Западная Сахара	267 405	0.89	5,22	0,6	15,66	0,1	0,16	433,6	6,79	156,600
18	Зимбабве	390 757	1.3	7,63	16	22,89	1,5	0,09	433,4	9,92	228,900
19	Кабо-Верде	4033	0.01	0,08	0,55	2,4	0,1	0,18	433,7	1	2,400
20	Камерун	475 442	1.58	9,29	27	78,7	2,5	03,09	433,1	12,07	7,8700
21	Канарские острова	7447	0.02	0,15	2,2	4,5	2,5	1,13	433,2	19	4,500
22	Кения	580 367	1.93	11,36	55	340,8	3	0,05	433,5	14,74	340,800
23	Коморы	2235	0.007	0,04	0.8	1,2	0,1	0,12	433,0	0,6	1,2000
24	Кот д'Ивуар	322 462	1.07	6,30	29,38	91.07	3,5	0,12	433,3	8,19	189,000
25	Лесото	30 355	0.1	0,59	2,1	7,7	0,5	0,23	433,0	0,77	17,7000
26	Либерия	111 369	0.37	2,18	5	6,54	0,2	0,04	433,7	2,83	65,400
27	Ливия	1 759 540	5.86	34,37	6,8	10,33	7	0,06	433,5	44,68	1031,100
28	Маврикий	2040	0.007	0,04	1,3	12	0,5	0,38	433,6	5	1,200
29	Мавритания	1 030 700	3.43	20,13	4,9	6,03	0,5	0,10	433,3	26,17	603,900
30	Мадагаскар	587 041	1.95	11,47	29	34,41	0,4	0,01	433,3	14,91	344,100
31	Малави	118 484	0.39	2,31	20	69,3	0,4	0,02	433,3	3,01	69,300
32	Мали	1 240 192	4.12	24,22	20	72,66	0,5	0,02	433,4	31,49	726,600
33	Марокко	446 550	1.49	8,72	37	61,6	10	0,27	433,5	11,34	261,600
34	Мозамбик	801 590	2.67	15,66	32	46,98	2,1	0,06	433,2	20,35	469,800
35	Намибия	825 418	2.75	16,12	2,5	48,36	0,5	0,2	433,4	20,96	483,600
36	Нигер	1 267 000	4.21	24,75	25	74,25	0,1	0,004	433,3	32,17	742,500
37	Нигерия	923 768	3.07	18,04	223	540	13	0,06	433,4	23,46	54,000
38	Республика Конго	342 000	1.14	6,68	5,5	20,04	0,5	0,02	433,1	8,68	200,400
39	Руанда	26 798	0.09	0,52	13	56	0,2	0,01	433,9	0,68	15,600
40	Сан-Томе и Принсипи	964	0.003	0,019	0,22	5,7	0,03	0,13	433,8	2,45	0,570
41	Сенегал	196 723	0.65	3,84	17	52	1,2	0,10	433,2	4,99	115,200
42	Сомали	637 657	2.12	12,45	16	37,35	0,3	0,01	433,5	16,19	373,500
43	Сомалиленд	176 120	0.58	3,44	4,5	10,32	0,1	0,02	433,1	4,47	103,200
44	Судан	1 886 068	6.28	36,84	45	110,52	3,5	0,07	433,3	47,89	1105,200
45	Сьерра-Леоне	71 740	0.24	1,40	8	42	0,1	0,01	433,3	1,82	42,000
46	Танзания	945 087	3.14	18,46	61	554	1,5	0,02	433,8	2,34	553,800
47	Того	56 785	0.19	1,11	8	33,3	0,3	0,04	433,4	1,44	33,300
48	Тунис	163 610	0.54	3,20	12	96	4	0,33	433,3	41,5	96,000
49	Уганда	236 040	0.78	4,61	48	138,3	1,2	0,03	433,1	5,99	138,300
50	Централная аффрика	622 984	2.07	12,18	5,5	36,54	0,1	0,01	433,9	15,82	365,400
51	Чад	1 284 000	4.27	25,08	18,28	75,24	0,1	0,005	433,3	32,60	752,400
52	Экваториальная Гвинея	28 051	0.09	0,55	1,4	16,5	2,5	3,5	433,3	7,1	16,500
53	Эсватини	17 364	0.057	0,34	1,2	10,2	0,3	0,25	433,4	0,44	10,200
54	Эфиопия	1 104 300	3.68	21,56	126,5	646,8	4,5	0,03	433,5	28,04	646,800
55	Южно-Африканская Республика	1 221 037	4.06	23,85	60	71,55	50	0,83	433,3	310	715,500
56	Республика Южный Судан	619 745	2.06	1,21	11	36,30	0,1	0,009	433,6	15,74	36,300
57	Мадейра	828	0,003	0,002	0,25	0,48	0,0002	0	433,7	0,02	0,05
58	Майотта	374	0,001	0,001	0,3	2,1	0,0001	0	433,2	0,01	0,021
59	Мелилья	12	0,00004	0,0023	0,086	0,69	0,003	0	433,8	0,003	0,001
60	Реюньон	2512	0,008	0,005	0,86	1,5	0,006	0	433,	0,06	0,15
61	Острова Святой Елены,Вознесения иТристан-да-Кунья	413	0,001	0,0008	0,46	2,4	0,01	0,0	433,6	0,01	0,0240
62	Республика Сейшельские Острова	451	0,001	0,0009	0,119	0,27	0,001	0	433,0	0,01	0,03
	Итого	30370000	100	594,23523	1436,83		235.47			744,0	17 827 057

5.Заключение. Перспективы использования результатов исследования.

Суммарная мощность текущих источников генерации приведена на душу населения в 2025 году, кВт/чел.

5.1. Суммарная мощность текущих источников генерации в России равна 250 ГВт.

Количество жителей 144 млн. чел. 250 ГВт :144 млн. чел =1,74 кВт/чел.

Суммарная мощность текущих источников генерации в США равна 1200 ГВт.

Количество жителей 333 млн. чел. 1200 ГВт:333 млн. чел = 3,60 кВт/чел.

Суммарная мощность текущих источников генерации в Китае равна 2400 ГВт.

Количество жителей 1400 млн. чел. 2400 :1400 = 1,70 кВт/чел.

5.2. Данные таблицы 1 позволяют выполнять анализ долгосрочных перспектив проектирования и строительства континентальных нейроэнергосистем с учетом нормативных требований от 100 до 5000 лет [4].

5.3. Если рассматривать в качестве примера Африканский континент, то при площади суши 30,3 млн км^2 и процентном соотношении 20,34%, количество электронных клеток - автоматов - поселений Святой крест составляет 591,80 тыс. штук, то мощность генерирующих источников континентальной нейроэнергосистемы в долгосрочной перспективе составляет 769,3 ТВт.

5.4. На африканском континенте располагается 62 государства, которые являются структурными единицами африканской континентальной нейроэнергосистемы.

Республики Кот-д-Ивуар, Алжир являются структурными единицами африканской континентальной нейроэнергосистемы.

5.5. ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ имени Н.В. Парахина», компанией «Патент», научно-исследовательским и проектным институтом «Градоагроэкопром» совместно с заинтересованными организациями и предприятиями России и Африки ведутся разработки генеральных планов республиканских нейроэнергосистем африканской континентальной нейроэнергосистемы на долгосрочную перспективу до 2530 года.

Выводы

1. Согласно указанию Президента России В.В. Путина Россия будет укреплять сотрудничество со странами Африки, Азии и Латинской Америки в области сельского хозяйства, промышленности, энергетики, образования и культуры.

2. На африканском континенте располагается 62 государства, которые являются структурными единицами африканской континентальной нейроэнергосистемы.

2. Впервые в мировой практике дано определение нейроэнергосистемы.

3. Создание Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой энергосистемы планеты Земля высшей категории надежности решает задачи преодоления голода, болезней, увеличения энерговооруженности, продолжительности и качества жизни, подготовки кадров для ключевых отраслей республик Африки.

4. Разработана методика определения технико-экономических показателей и весовых отношений республиканских нейроэнергосистем Африканской континентальной нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной многоуровневой нейроэнергосистемы планеты Земля высшей категории надежности.

5. Разработан инструмент анализа перспектив развития континентальных нейроэнергосистем.

6. Мощность генерирующих источников Африканской континентальной нейроэнергосистемы в долгосрочной перспективе 2530 год, составляет 769,3 ТВт.

Список использованных источников:

1. Шарупич В.П., Шарупич П.В., Шарупич С.В., Шарупич Т.С./ «Континентальные нейроэнергосистемы планетарной подземно-подводной нейроэнергосистемы планеты Земля

высшей категории надежности с четырьмя независимыми источниками энергии. Методические положения». Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе» Том 2: 03-04 декабря 2024 г. – Орел: Изд-во Орловский ГАУ, 2024 – С.372-377.

2. Путин В.В. саммит «Россия – Африка». Санкт-Петербург 27-28 июля 2023 г.

3. Общие представления о Земле. Интернет ресурс.

4. Шарупич В.П., Шарупич С.В., Шарупич П.В., Шарупич Т.С., Антохин А.Ю.. Методология расчета социальной экологичности, надежности электроснабжения, увеличения продолжительности жизни человека и развития территорий в системе электроснабжения типа «Андреевский крест» // Успехи современной науки. - 2017.-Том 2.-№8,- С.35-40.

5. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*)

6. Шарупич В.П., Бессмертие. Том.1, Учебник для ВУЗов – Орел: Патент- Град-_РИЦ.- 2008, 892 с.

7. Планетарная карта сети Sharupich.net самоокупаемых бессмертных поселений ОАОЭ «Saint cross». ОАОЭ «Святой крест»- Гнездилово. «Святое Гнездилово». Программа нахождения географической координаты по номеру поселения ОАОЭ «Saint cross». Версия 2011.1. Отчет о НИР НИПИ «Градоагроэкопром»,- Орел., 2011, 180 с. (Шарупич В.П., Лисенков О.Н.)

Шарупич В.П., д.т.н., доцент, профессор,
ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина»,
Директор института НИПИ «Градоагроэкопром»
Шарупич П.В., д.пр.н., зам. ген. директора, ООО «Патент»
Шарупич С.В., д.пр.н., зам. директора по информационным технологиям НИПИ «Градоагроэкопром» ООО «Патент»
Шарупич Т.С., к.т.н., д.пр.н., зам. директора по научной работе НИПИ «Градоагроэкопром» ООО «Патент»
Шарупич С.С., инж. НИПИ «Градоагроэкопром» ООО «Патент»
Гиамфи Ассале Эме Сезер аспирант ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина», Республика КОТ–Д - Ивуар, Африка

TECHNICAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS, WEIGHT RATIO OF STRUCTURAL UNITS OF THE AFRICAN CONTINENTAL NEUROENERGY SYSTEM OF THE PLANETARY UNDERGROUND-UNDERWATER MULTI-LEVEL NEUROENERGY SYSTEM OF PLANET EARTH OF THE HIGHEST CATEGORY OF RELIABILITY WITH FOUR INDEPENDENT ENERGY SOURCES FOR THE LONG-TERM PERIOD UNTIL 2530. THE KEY TO AFRICA

Sharupich V.P., FGBOU VO "Oryol State University named after N.V. Parakhin",
Sharupich P.V., LLC "Patent"
Sharupich S.V., NIPI "Gradoagroekoprom" LLC "Patent"
Sharupich S.S., NIPI "Gradoagroekoprom" LLC "Patent"
Giamfi Assale Aime Sezer, Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin"

Annotation. At the Russia-Africa Summit, Russian President Vladimir Putin stated that Russia will strengthen cooperation with countries in Africa, Asia, and Latin America in energy, agriculture, industry, education, and culture. A key focus is the 62 structural units of the African Continental Neuroenergy System, a planetary underground and underwater multi-level energy system of the planet Earth with the highest reliability category. Scientific research and construction of the African Continental Neuroenergy System are being carried out in accordance with the planetary scientific and practical direction: "A typical structural unit of the straitjacket of humanity." A neural network for reinforcing vandal-proof dynamic-biological 746-phase industry routers-generators for connecting internal local area networks for 696 subscribers and external local area networks for 8 subscribers - electronic cells-automatons-quadropolises of the Holy Cross settlements, with the location of guiding settlements in two mutually perpendicular directions and intended for reinforcing prefabricated neural networks and their monolithic sections - structures - regions, federations, the Planet based on dynamic biochips, bioelectrons - as a mechanism for maintaining nominal engineering-biological and psychological characteristics of a person (EBP), increasing the efficiency of management and development of the nuclear energy industry of the Russian Federation. Anti-nuclear, anti-missile, anti-bomb multi-level protection of the 8th level. Education, research, design, production, construction, operation, financing. Technologies. TC against organized crime groups (zeroing the number of psychos, homeless people, criminals).

Sharupich V.P., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, FGBOU VO "Oryol State University named after N.V. Parakhin",
Director of the Institute NIPI "Gradoagroecoprom"
Sharupich P.V., Doctor of Practical Sciences Deputy General Director,
LLC "Patent"
Sharupich S.V., Doctor of Practical Sciences, Deputy. Information Technology Directors NIPI "Gradoagroekoprom" LLC "Patent"
Candidate of Technical Sciences, Doctor of Practical Sciences Deputy. Scientific Director of NIPI "Gradoagroekoprom" LLC "Patent"
Sharupich S.S., NIPI "Gradoagroekoprom" LLC "Patent"
Giamfi Assale Aime Sezer postgraduate student of the Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin", Republic of CÔTE D'Ivoire, Africa

Реклама в нашем журнале

ВНИМАНИЕ!

Редакция **ЖУРНАЛА «АГРОТЕХНИКА И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ»**
приглашает Вас к сотрудничеству.

Мы предлагаем разместить Вашу рекламу на страницах нашего журнала.
Наши читатели (Россия и зарубежье) — учебные и научные учреждения, предприятия следующих отраслей деятельности:

- сельскохозяйственные предприятия;
- предприятия тяжелой и легкой, перерабатывающей промышленности;
- энергокомпании;
- отраслевые НИИ;
- научно-производственные объединения;
- учебные заведения;
- библиотеки.

Каждый из номеров журнала распространяется более чем 500 адресатам.

Информацию о возможности размещения рекламной продукции и ценах Вы можете узнать в редакции журналов, а также у главного редактора.

Телефоны: 8202879024; 8(4862) 76-44-69.
Тел. (факс): 8(4862) 76-11-07

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – доктор технических наук, доцент
Александр Владимирович Виноградов
E-mail: winaleksandr@yandex.ru

Адрес: 302019, г. Орел, ул. Ген. Родина, 69, Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, факультет агротехники и энергообеспечения, ауд. 2-211.

ФГБОУ ВО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.В. ПАРАХИНА»

Отдел сельскохозяйственного консультирования и развития сельских территорий ВНИИ социального развития села ФГБОУ ВО Орловский ГАУ принимает заявки на оказание консультационных услуг по следующим направлениям:

- в области агробизнеса и экологии;
- в области биотехнологий и ветеринарной медицины;
- в области экономики;
- в сфере социального и экономического развития сельских территорий;
- в области агротехники и энергообеспечения;
- в сфере строительства, эксплуатации и управления недвижимостью, ландшафтного дизайна;
- в сфере охраны труда и пожарной безопасности и др.

Более подробная информация об оказываемых услугах размещена на странице отдела по адресу:
http://www.orelsau.ru/science/institute-of-social-development-of-the-village/

Телефон: 8 (4862) 43-30-81
E-mail: vniisrs.orelsau@mail.ru

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ совместно с ФГБОУ ВО Орловским ГАУ организуют проведение постоянного научно-практического семинара «Энергообеспечение АПК»

Формат проведения: видеосвязь.
Периодичность: по мере поступления заявок на проведение.
Темы:
-всё, что связано с вопросами энергообеспечения АПК, электротехнологиями и электрооборудованием в АПК;

-вопросы цифровизации и роботизации в АПК и системах его энергообеспечения;

-современное сельскохозяйственное производство, проблемы и пути их решения, новые технологии;

-предварительное обсуждение кандидатских и докторских диссертаций;

-обсуждение совместных проектов, грантов;

- другие тематики.

Для участия, предложения тематики обсуждения:
написать письмо на электронную почту (в названии указать «семинар Энергообеспечение АПК»)
Почта: winaleksandr@gmail.com
Телефон: 89202879024 – Виноградов Александр Владимирович
При поступлении заявки на участие, адрес обратившегося вносится в рассылку и он уведомляется о теме и сроках проведения семинара.

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

ТАЙМЕР-ЭЛЕКТРОСЧЕТЧИК МОБИЛЬНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ С БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ (ТЭМП-3-W)

TIMER-ELECTRIC METER MOBILE PORTABLE WITH WIRELESS DATA TRANSMISSION (TEMMP-3-W)

Устройство решает следующие задачи:



- осуществление удалённых измерений (передача результатов на сайт. Хранение результатов на карте памяти);
- определение потерь на участках электрической сети;
- сведение энергобалансов по участкам сети;
- оптимизация уставок ПБВ силовых трансформаторов;
- обследование ЛЭП с выявлением причин завышенных потерь, показателей качества электроэнергии;
- энергоаудит сетей и оборудования сельхозпредприятий;
- построение графиков нагрузки, оценка времени наработки оборудования;
- проверка средств релейной защиты и автоматики;
- использование в качестве штатного измерительного прибора;
- оценка потерь электроэнергии в силовых трансформаторах без отключения их от сети и с ранжированием на потери короткого замыкания, нагрузочные потери и потери холостого хода;
- выявление хищений электроэнергии при обходах потребителей, за счет возможности установки устройства до электросчетчика абонента без разрывания электрической цепи и без нарушения её изоляции.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Дальность передачи данных: до 1,5 км	Диапазон измерения напряжения: 0 – 450 В
Время автономных измерений: до 24 ч	Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная
Стоимость: 20-30 тыс. руб. (в зависимости от комплектации)	Степень защиты оболочки: IP55

Контактная информация

+79202879024 (Александр Виноградов) schkolamolen@gmail.com

+79536281466 (Алексей Букреев) alexziend@gmail.com

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

ТАЙМЕР-ЭЛЕКТРОСЧЕТЧИК МОБИЛЬНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ТРЁХФАЗНЫЙ (ТЭМП-3)

TIMER-ELECTRIC METER MOBILE PORTABLE THREE-PHASE (TEMMP-3)

ТЭМП-3 осуществляет:



- учет электроэнергии;
- измерение и архивирование значений времени включенного/отключенного состояния потребителя с фиксацией моментов включения и отключения;
- измерение и архивирование значений потребляемого тока;
- измерение напряжения и архивирование значений напряжения;
- измерение и архивирование максимальных значений потребляемого тока;
- измерение и архивирование максимальных значений потребляемой мощности;
- измерение и архивирование значений потребляемой мощности без измерения значений напряжения;
- измерение и архивирование значений потребляемой мощности с измерением значений напряжения.

ТЭМП-3 может использоваться для:

- сведения энергобалансов по участкам сети;
- энергоаудита сетей и оборудования сельхозпредприятий;
- построения графиков нагрузки, оценки времени наработки оборудования;
- проверки средств релейной защиты и автоматики;
- использования в качестве штатного измерительного прибора;
- выявления хищений электроэнергии при обходах потребителей, за счет возможности установки устройства до электросчетчика абонента без разрывания электрической цепи и без нарушения её изоляции.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Время автономных измерений: 24 ч	Диапазон измерения напряжения: 0 – 450 В
Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная	Степень защиты оболочки: IP55

Стоимость: 15-30 тыс. руб.
(в зависимости от комплектации)

Контактная информация

+79202879024
(Александр Виноградов)
schkolamolen@gmail.com

+79536281466
(Алексей Букреев)
alexziend@gmail.com

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
при участии ФГБОУ ВО Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина

ПРИБОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 кВ (КОПиРР)

INSTRUMENT COMPLEX FOR ESTIMATING ELECTRICITY LOSSES AND STUDYING THE OPERATING MODES OF ELECTRICAL NETWORKS 0.4 kW (CELaOM)

Комплекс решает следующие задачи:



- измерение и архивирование потребляемого тока в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование потребляемой мощности в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование потребляемой электроэнергии в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование потребляемой электроэнергии в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование значений напряжений трехфазной сети в точках установки датчиков комплекса;
- фиксация моментов включения и отключения нагрузки на участке сети в точках установки датчиков комплекса;
- дистанционное получение данных о параметрах режимов работы сети с датчиков комплекса через радио-канал;
- синхронизацию по времени измерения между датчиками, входящими в комплекс и привязка к астрономическому времени.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Дальность передачи данных: до 1,5 км	Диапазон измерения напряжения: 0 – 450 В
Время автономных измерений: до 24 ч	Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная
Количество точек измерения (кол-во измерительных блоков): до 6	Наличие проколов для изолированных проводов (СИП и тд.)
Стоимость: 80-100 тыс. руб. (в зависимости от комплектации)	Степень защиты оболочки: IP65

Контактная информация

+79202879024 (Александр Виноградов) schkolamolen@gmail.com

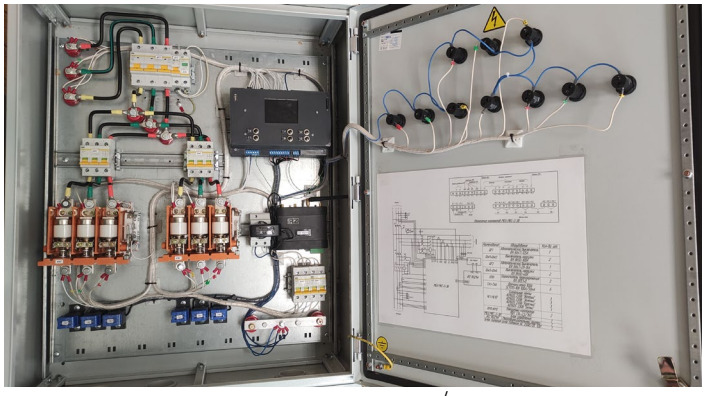
+79536281466 (Алексей Букреев) alexziend@gmail.com

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
при участии
ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
им. Н.В. Парахина

МУЛЬТИКОНТАКТНАЯ КОММУТАЦИОННАЯ СИСТЕМА С ДВУМЯ КОНТАКТНЫМИ ГРУППАМИ И ТРЕМЯ ВЫВОДАМИ (МКС-2-3В)

MULTI-CONTACT SWITCHING SYSTEM WITH TWO CONTACT GROUPS AND THREE TERMINALS (MSS-2-3T)

В МКС-2-3В реализованы следующие функции:



- измерение значений токов в магистрали и отпайке ЛЭП;
- измерение значений напряжений на выводах;
- управление двумя независимыми коммутационными аппаратами;
- выполнение функции автоматического повторного включения (АПВ);
- обмен данными по интерфейсу RS-485;
- автоматическое включение/отключение коммутационных аппаратов при появлении/ исчезновении напряжения на вводе;
- автоматическое отключение коммутационных аппаратов при превышении заданных токовых уставок;
- передача данных по протоколу Modbus RTU;
- осуществление сигнализации диспетчеру;
- отображение символьных данных на дисплее контроллера МКС-2-3В;
- запись основных измеренных параметров на внешний накопитель;
- передача данных по протоколу Modbus RTU;
- ручное включение/отключение коммутационных аппаратов с помощью клавиатуры контроллера;
- диспетчерское включение/отключение коммутационных аппаратов;
- ручная и диспетчерская настройка параметров контроллера;
- сохранение значений конфигурационных параметров в энергонезависимой памяти.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Количество контактных групп: 2	Диапазон измерения напряжения: 0 – 270 В
Протокол передачи данных: Modbus RTU	Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная
Стоимость: 60-100 тыс. руб. (в зависимости от комплектации)	Время автономной работы контролера:10 ч.

Контактная информация

+79202879024 (Александр Виноградов) schkolamolen@gmail.com

+79536281466 (Алексей Букреев) alexziend@gmail.com