



Научно-практический журнал. Основан в 2005 году. Предыдущее название «Вестник ВИЭСХ». Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям: 2.4.5 / 4.3.1 / 4.3.2. Входит в базу данных AGRIS и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Редакционная коллегия:

Д.А. Тихомиров, д.т.н., профессор РАН, член-корр. РАН (главный редактор)

Д.А. Будников, д.т.н.;

(заместитель главного редактора);

А.Ю. Измайлов, д.т.н., профессор,

академик РАН, член Президиума РАН;

Я.П. Лобачевский, д.т.н., профессор, академик РАН;

А.С. Дорохов, д.т.н., профессор, академик РАН;

А.А. Ковалев, д.т.н.;

А.В. Виноградов, д.т.н., профессор;

М.М. Благовещенская, д.т.н., проф.;

М.Г. Тягунов, д.т.н., профессор;

В.И. Зацепина, д.т.н., профессор.

Иностранные члены редколлегии:

И.И. Гируцкий, д.т.н., профессор (Беларусь);

А.Б. Оспанов, д.т.н., профессор, член-корр. НАН РК

(Республика Казахстан);

П.А. Утениязов, д.т.н., с.н.с.

(Республика Узбекистан);

Пандиан Васант, д-р философии (Малайзия);

В. Вивекананд, д-р философии, доцент (Индия);

Салам Чафик-Тома, профессор (Франция).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-74528 от 14.12.2018 г.

Адрес издателя, редакции и типографии: 109428, Москва,

1^й Институтский проезд, 5, стр. 1.

Телефон: (499)174-88-11; (499)174-89-01

E-mail: vestnikviesh@gmail.com

Ответственный секретарь

Р.М. Нурбагандова

Редактор

Т.В. Бердникова

Компьютерный оригинал-макет

В.В. Бижаев

Перевод – Константин Моренко

Выходит 4 раза в год (Свободная цена)

Дата выхода в свет 16.06.2026 г.

Формат 60×84/8. Объем 16,25 печ. л.

Тираж 100 экз. Печать цифровая.

Отпечатано в типографии

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

ISSN 2658-4859

Содержание номера

Электрофизические воздействия на материалы и среды

Кузин А.В., Шмигель В.В.

Универсальный программный комплекс «OzoneSimula» для моделирования и оптимизации процессов озоновой дезинвазии 3

Поручиков Д.В.

Разработка лабораторной СВЧ-установки для термообработки субпродуктов 9

Самарин Г.Н., Беляков М.В., Ефременков И.Ю.

Обоснование эксплуатационных параметров лабораторного стенда для фотолюминесцентной диагностики молока 18

Угловский А.С., Белов А.А.

Разработка мини-модуля биоимпедансной диагностики сорных растений для оптимизации параметров электроимпульсной прополки 24

Электроснабжение и электрооборудование

Зиниев Ш.З., Каргин В.А., Кротов И.В., Магомадов Р.А.-М.

Разработка и применение нейросетевой модели для прогнозирования аварийности в сельских распределительных сетях 0,4 кВ 33

Поздняков И.В., Виноградов А.В., Шарунич В.П.

Моделирование устройства высокочастотной передачи информации по питающей сети 40

Юферев Л.Ю., Роцин О.А.

Однопроводная полуволновая резонансная передача электроэнергии на повышенной частоте 50

Тепло-энергообеспечение и энергосбережение

Корольков С.А., Липа О.А.

Интеллектуальные системы управления микроклиматом для повышения энергоэффективности вертикальных ферм 57

Буторин В.А., Царев И.Б., Андреева М.В.

Вероятностно-статистическая модель оценки ресурса кожухотрубных теплообменных аппаратов 63

Автоматизация и управление технологическими процессами

Рыкунов В.В., Гребенчиков Н.И., Шестов Д.А.

Цифровые решения для управления молочными фермами: сравнительный анализ современных российских систем 69

Технологии и средства механизации и роботизации

Мамонтова Т.В., Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С.

Удлинение производственной структуры животноводческих комплексов в условиях внедрения искусственного интеллекта: рыночные и энергетические эффекты региональной интеграции 80

Электропривод и мобильные установки

Левченко Н.А., Ястребов С.С., Адошев А.И., Колесников Г.Ю.

Разработка программно-аппаратного комплекса для определения передаточной функции преобразователя частоты 93

Возобновляемая и нетрадиционная энергетика

Белов С.И., Лештаев О.В.

Анализ применения гибридных систем возобновляемой энергетики для электроснабжения потребителей в сельской местности России 100

Арифов А.М., Бекиров Э.А., Юферев Л.Ю.

Анализ применения способов и устройств для повышения энергоэффективности фотоэлектрических преобразователей 115

Махиянов А.В., Саттаров Р.Р., Азнагулов А.И.

Компьютерное моделирование многофазной ветроэнергетической установки для электроснабжения объектов агропромышленного комплекса 123

Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex

The editorial board of the journal:

Dmitriy A. Tikhomirov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor of the RAS, Corresponding
Member of the RAS (Editor in Chief);
Dmitry A. Budnikov, Dr.Sc.(Eng.);
(Deputy Editor);
Andrey Yu. Izmaylov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor, Member of the RAS,
Member of the Presidium of the RAS;
Yakov P. Lobachevskiy, Dr.Sc.(Eng.),
Professor, Member of the RAS;
Alexey S. Dorokhov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor, Member of the RAS;
Andrey A. Kovalev, Dr.Sc.(Eng.);
Aleksandr V. Vinogradov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor;
Margarita M. Blagoveshchenskaya,
Dr.Sc.(Eng.), Professor;
Mikhail G. Tyagunov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor;
Violetta I. Zatssepina, Dr.Sc.(Eng.),
Professor.

Foreign members of the Editorial Board:

Ivan I. Girutsky, Dr.Sc.(Eng.),
Professor (Belarus);
Asan B. Ospanov, Dr.Sc.(Eng.), Prof.,
Corresponding Member of NAS RK
(Republic of Kazakhstan);
Pulat A. Uteniyazov, Dr.Sc.(Eng.),
Chief Specialist,
(Republic of Uzbekistan);
Vasant Pandian, Dr. Philosophy,
Senior Lecturer, (Malaysia);
V. Vivekanand, Dr. Philosophy,
Assistant Professor (India);
Salam Chafik-Toma, Professor
(France).

PUBLISHER, EDITORIAL OFFICE'S AND PRINTING HOUSE ADDRESS

109428, Moscow,
1st Institutskiy proezd, 5, bld. 1.
Tel.: +7 (499) 174-88-11
+7 (499) 174-89-01
<http://www.vimsmit.com>
E-mail: vestnikviesh@gmail.com

EXECUTIVE EDITORS:

Nurbagandova R.M.
Berdnikova T.V.,
Bizhaev V.V.,
Translation into English –
Konstantin Morenko

Published 4 times per annum (Free price)

Release date 16.06.2026.
The format is 60×84/8.
Volume 15.25 printed sheet.
The circulation is 100 copies
Printed by FSAC VIM

ISSN 2658-4859

Contents

Electrophysical effects on materials and media

- Cuzin A.V., Shmigel V.V.*
Universal Software Package «OzoneSimula» for modeling
and optimization of ozone disinfection processes 3
- Poruchikov D.V.*
Development of a laboratory microwave installation for heat treatment
of by-products 9
- Samarin G.N., Belyakov M.V., Efremenko I.Yu.*
Justification of the operational parameters of the laboratory installation
for photoluminescent diagnostics of milk 18
- Uglovskiy A.S., Belov A.A.*
Development of a mini-module for bioimpedance weed diagnostics to optimize
parameters of electric pulse weeding 24

Power supply and electrical equipment

- Ziniev Sh.Z., Kargin V.A., Krotov I.V., Magomadov R.A.-M.*
Development and application of a neural network model for predicting failure
rate in rural distribution grids of 0.4 kV 33
- Pozdnyakov I.V., Vinogradov A.V., Sharupich V.P.*
Simulation of a high-frequency information transmission device over a power grid 40
- Yuferev L.Yu., Roshchin O.A.*
Single-wire half-wave resonant transmission of electricity at an increased frequency 50

Heat supply and energy saving

- Korolkov S.A., Lipa O.A.*
Intelligent microclimate management systems for enhancing energy efficiency
in vertical farming 57
- Butorin V.A., Tsarev I.B., Andreeva M.V.*
Probabilistic and statistical model for estimating the resource of shell-and-tube heat
exchangers 63

Automation and technological processes control

- Rykunov V.V., Grebenshchikov N.I., Shestov D.A.*
Digital solutions for dairy farm management: a comparative analysis
of modern Russian systems 69

Technologies and means of mechanization and robotization

- Mamontova T.V., Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S.*
Extending the production structure of livestock farms in the context of artificial
intelligence implementation: market and energy effects of regional integration 97

Electric drive and mobile units

- Levchenko N.A., Yastrebov S.S., Adoshev A.I., Kolesnikov G.Yu.*
Development of a hardware and software complex for determining the transfer
function of a frequency converter 93

Renewable and unconventional energy

- Belov S.I., Leshtaev O.V.*
Analysis of the use of hybrid renewable energy systems for power supply
to consumers in rural areas of Russia 115
- Arifov A.M., Bekirov E.A., Yuferev L.Yu.*
Analysis of the application of methods and devices to improve the energy efficiency of
photovoltaic converters 115
- Makhiyanov A.V., Sattarov R.R., Aznagulov A.I.*
Computer simulation of a multiphase wind power plant for power supply
of agro-industrial facilities 123

Полные тексты статей размещаются на сайте электронной научной библиотеки: elibrary.ru.
Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, допускается только с разрешения редакции.



Универсальный программный комплекс «OzoneSimula» для моделирования и оптимизации процессов озоновой дезинвазии

Артём Викторович Кузин,

аспирант, e-mail: artcuz@bk.ru;

Владимир Викторович Шмигель,

доктор технических наук, профессор, e-mail: volod49@mail.ru

Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Российская Федерация

Реферат. Озонирование является перспективным методом дезинвазии сточных вод сельскохозяйственных предприятий, однако его практическое применение затруднено из-за сложной нелинейной зависимости эффективности от ряда технологических параметров. (Цель исследования) Разработать, программно реализовать и апробировать универсальный программный комплекс для сквозного моделирования полного технологического цикла озоновой обработки и оптимизации его параметров по критерию минимума энергозатрат. (Материалы и методы) Основой программного комплекса «OzoneSimula» является система связанных математических моделей, реализованных на языке Python 3.9. Комплекс интегрирует три взаимосвязанных модуля: модуль генерации озона, основанный на модели барьерного разряда; параметризуемый модуль массопереноса и кинетики; модуль биоцидного действия. Верификация проведена на примере нематоды *Ascaridia galli*. (Результаты и обсуждение) Получены результаты моделирования процесса озоновой обработки водной суспензии. Установлено, что минимальная эффективная доза озона для достижения 99 процентной гибели популяции составляет ≈ 105000 миллиграмм-секунда на литр. Реализованный алгоритм оптимизации позволил снизить удельные энергозатраты на 20 процентов при сохранении требуемой эффективности. (Выводы) Разработанный программный комплекс, прошедший государственную регистрацию, представляет собой инструмент для перехода от эмпирического подбора к научно обоснованному проектированию и оптимизации режимов озоновой обработки сточных вод в агропромышленном комплексе.

Ключевые слова: озон, математическое моделирование, программирование, дезинвазия, оптимизация, сточные воды, программный комплекс.

Для цитирования: Кузин А.В., Шмигель В.В. Универсальный программный комплекс «OzoneSimula» для моделирования и оптимизации процессов озоновой дезинвазии // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 3-8. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-3-8. EDN: LSELLT.

Scientific article

Universal Software Package «OzoneSimula» for Modeling and Optimization of Ozone Disinfection Processes

Artem V. Cuzin,

postgraduate, e-mail: artcuz@bk.ru;

Vladimir V. Shmigel,

Dr.Sc.(Eng.), associate professor, e-mail: volod49@mail.ru

Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russian Federation

Abstract. Ozonation is a promising method of disinfection of wastewater from agricultural enterprises, but its practical application is difficult due to the complex nonlinear dependence of efficiency on a number of technological parameters. (Research purpose) The research purpose is developing, implementing and testing a universal software package for end-to-end modeling of the full technological cycle of ozone

treatment and optimization of its parameters according to the criterion of minimum energy consumption. The basis of the *OzoneSimula* software complex is a system of related mathematical models implemented in Python 3.9. The complex integrates three interrelated modules: ozone generation module based on the barrier discharge model; parameterizable mass transfer and kinetics module; biocidal action module. Verification was carried out on the example of the nematode *Ascaridia galli*. (Results and discussion) The results of modeling the ozone treatment process of aqueous suspension are obtained. It has been established that the minimum effective dose of ozone to achieve 99 percent population death is $\approx 105,000$ milligrams-seconds per liter. The implemented optimization algorithm allowed to reduce specific energy costs by 20% while maintaining the required efficiency. (Conclusions) The developed software package, which has passed state registration, is a tool for transition from empirical selection to scientifically based design and optimization of ozone treatment modes for wastewater in the agro-industrial complex.

Keywords: ozone, mathematical modeling, programming, disinvasion, optimization, wastewater, software package.

For citation: Cuzin A.V., Shmigel V.V. Universal Software Package «OzoneSimula» for Modeling and Optimization of Ozone Disinfection Processes. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 3-8 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-3-8. EDN: LSELLT.

Эффективная дезинвазия сточных вод сельскохозяйственных предприятий, направленная на уничтожение возбудителей инвазионных болезней при гельминтозах, представляет собой актуальную проблему, требующую разработки энергоэффективных и экологически безопасных технологий. Озонирование, обладающее высокой окислительной способностью, демонстрирует значительный потенциал для уничтожения устойчивых форм паразитов, включая яйца гельминтов [1].

Вместе с тем применение и проектирование озонных установок затруднены из-за сложной нелинейной зависимости конечной эффективности от каскада взаимосвязанных физико-химических процессов: электрогенерации O_3 в разряде, его массопереноса в гетерогенную водную среду, конкурирующих реакций с органическими примесями и, наконец, из-за биоцидного действия на целевые организмы [2]. Существующие подходы часто носят эмпирический характер, что ведет к значительным энергозатратам и неоптимальным технологическим решениям. При этом отсутствуют универсальные программные инструменты, позволяющие осуществлять сквозное (*end-to-end*) моделирование и оптимизацию всего технологического цикла – от электрических параметров генератора до гарантированной гибели конкретного вида паразита.

В предыдущих работах авторами были разработаны и верифицированы математические модели ключевых звеньев этого процесса: кинетика гибели гельминтов [3] и разрушения оболочек их яиц [4], а также детерминированная модель, связывающая параметры озонатора с концентрацией озона в об-

рабатываемой суспензии. Логическим развитием и интеграцией этих исследований является создание не частного решения для конкретного вида, а универсальной методологии и инструмента для научно обоснованного проектирования.

Цель исследования – разработать, программно реализовать и апробировать универсальный комплекс «*OzoneSimula*», предназначенный для сквозного моделирования полного технологического цикла озонной обработки и оптимизации его параметров по критерию наименьших энергозатрат.

В качестве модельного объекта для калибровки и демонстрации возможностей комплекса была выбрана нематода *Ascaridia galli*.

Материалы и методы. Основа программного комплекса «*OzoneSimula*» – это система связанных математических моделей, реализованных на языке *Python 3.9* в интегрированной среде разработки *Spyder*. Для численного интегрирования дифференциальных уравнений использовалась библиотека *SciPy*, для построения графиков – библиотека *Matplotlib*, а интерактивный веб-интерфейс создан с помощью библиотеки *Streamlit*.

Архитектура программы построена по модульному принципу и включает три взаимосвязанных вычислительных блока (*рис. 1*).

Модуль генерации озона описывает процесс получения O_3 в барьерном разряде. Выходная концентрация в газовой фазе $C_{(g,out)}$ рассчитывается на основе баланса мощности разряда P_{dis} , объёмного расхода газа Q_g и коэффициента эффективности η , комплексно зависящего от напряжения U , частоты f , температуры T и влажности ϕ [5]:

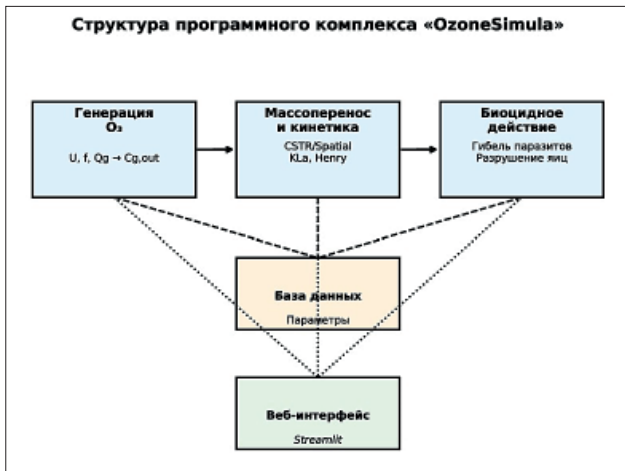


Рис. 1. Архитектура программного комплекса «OzoneSimula»
 Fig. 1. Architecture of the «OzoneSimula» software package

$$C_{g,out} = \frac{\eta(U,f,T,\phi) \cdot P_{dis}(U,f)}{Q_g} \quad (1)$$

Модель учитывает нелинейную зависимость выхода от напряжения с областью насыщения, что критично для выбора экономичной рабочей точки оборудования [6].

Параметризуемый модуль массопереноса и кинетики в реакторе предоставляет исследователю на выбор две расчётные модели гидродинамики:

Модель идеального перемешивания (*Continuous Stirred-Tank Reactor, CSTR*), описывающая систему с однородной концентрацией по всему объёму [7].

Упрощённая пространственная модель (*Spatial*), учитывающая возможные градиенты концентрации озона в аппарате за счёт введения эффективных поправочных коэффициентов к параметрам массопереноса и кинетики.

Динамика концентрации озона в воде C_w в рамках модели *CSTR* описывается уравнением с учётом абсорбции, саморазложения и реакций с органическими примесями (химическим потреблением кислорода – ХПК):

$$\frac{dC_w}{dt} = K_L a \cdot (C_w^* - C_w) - k_{rxn} \cdot C_w \cdot \text{ХПК} - k_{dec} \cdot C_w^n \quad (2)$$

где $K_L a$ – коэффициент массопередачи; C_w^* – равновесная концентрация по закону Генри, зависящая от температуры [8]; k_{rxn} – константа скорости реакции с примесями, c^{-1} ; k_{dec} – константа скорости разложения озона; n – порядок реакции разложения.

Модуль рассчитывает установившуюся концентрацию C_w , доступную для воздействия на паразита, а модуль биоцидного действия интегрирует ранее разработанные и верифицированные авторами кинетические модели [3, 4]:

Модель гибели взрослой особи нематоды, основанная на уравнении повреждения целостности кутикулы под действием окислительного стресса.

Многослойная модель разрушения оболочки яйца паразита, описывающая последовательное окисление липидного, хитинового и белкового слоёв с индивидуальными константами скорости.

На вход модуля подаётся рассчитанная концентрация C_w , а на выходе – фиксируются прогнозируемая эффективность обработки во времени и минимальная эффективная доза (МЭД) для достижения 99%-й гибели целевого объекта.

Для решения обратной задачи оптимизации режимов в программе реализован алгоритм на основе метода Нелдера-Мида [9], минимизирующий целевую функцию энергозатрат $F = P_{dis} \cdot t$ при ограничении эффективности $(U, f, T, \dots) \geq 99\%$, где P_{dis} – мощность разряда; t – время обработки.

Интерфейс пользователя, реализованный с использованием библиотеки *Streamlit*, предоставляет интуитивную панель управления для ввода параметров оборудования, характеристик обрабатываемой среды и выбора целевого объекта (рис. 2). Архитектура комплекса позволяет адаптировать его к различным видам гельминтов через пополняемую базу видовоспецифичных биоцидных параметров.

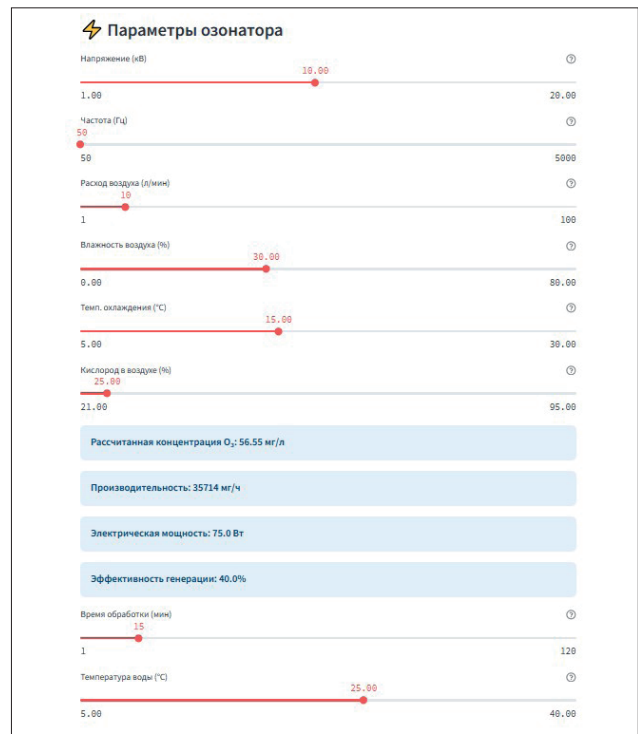


Рис. 2. Элемент интерфейса пользователя программы «OzoneSimula» (настройка параметров виртуального озонатора)

Fig. 2. Element of user interface of the «OzoneSimula» program (setting the parameters of the virtual ozonator)

Результаты и обсуждение. Используя разработанный программный комплекс «OzoneSimula», проведено моделирование процесса озоновой обработки водной суспензии, инфицированной нематодой *Ascaridia galli*. В качестве базового сценария заданы следующие параметры:

1. Для оборудования: напряжение на озонаторе – 10 кВ, частота – 50 Гц, расход газа – 10 л/мин., время обработки – 15 мин.

2. Для окружающей среды: температура воздуха – 15°C, относительная влажность воздуха – 30%, содержание кислорода в воздухе – 25%.

3. Для водной суспензии: ХПК – 50 мг/л, pH – 7,0, температура воды – 25°C, исходная концентрация паразитов – 100 ед./л для взрослых особей и 50 ед./л для яиц. Моделирование выполнено для реактора идеального перемешивания (CSTR).

Модуль генерации озона рассчитал выходные параметры озонатора: концентрация озона в газовой фазе – 56,55 мг/л, производительность – 35714 мг/ч, электрическая мощность – 75,0 Вт при эффективности преобразования энергии 40%.

Результаты моделирования массопереноса и биоцидного действия представлены на рисунке 3. Как видно из графиков (рис. 3a), концентрация озона в воде C_w быстро возрастает и стабилизируется на уровне 120-125 мг/л в течение 3-4 минут от начала обработки. Эффективность обеззараживания (рис. 3b) достигает 90% к 8-9-й минуте и 99% к 13-14-й минуте экспозиции. МЭД, соответствующая достижению 99%-й гибели популяции при данной стационарной концентрации, составила ≈ 105000 мг·с/л.

Кинетика повреждения многослойной оболочки яиц *A. galli* (рис. 3b) демонстрирует последовательное разрушение липидного, хитинового и белкового слоев, что подтверждает теоретическую модель, описанную в работах [3, 4]. Критическое повреждение хитинового слоя (около 80%), определяющего механическую прочность оболочки, обеспечивается через 11-12 минут обработки, что согласуется с уровнем достижения 99%-й эффективности гибели зародышей.

Общая динамика изменения основных параметров процесса (концентрации озона, численности гельминтов и яиц, ХПК) во время обработки представлена на рисунке 4.

Для демонстрации возможностей оптимизационного модуля была решена обратная задача: поиск режима обработки, обеспечивающей эффективность не менее 99%-й при минимальных энергозатратах ($P_{dis} \cdot t$). Алгоритм на основе метода Нелдера-Мида предложил оптимизированный режим действия

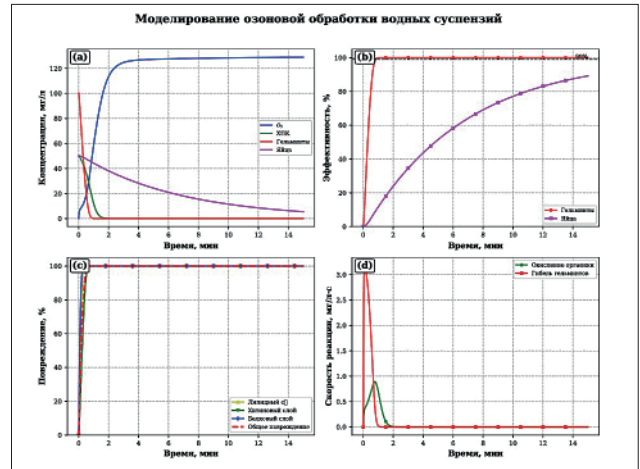


Рис. 3. Результаты моделирования процесса озоновой обработки суспензий, инфицированной *Ascaridia galli*: *a* – динамика концентрации озона (O_3), химического потребления кислорода и численности гельминтов; *b* – эффективность обеззараживания; *c* – динамика повреждения многослойной оболочки яиц гельминтов; *d* – скорость химических реакций окисления органики и гибели гельминтов

Fig. 3. Simulation results of the ozone treatment process of a suspension infected with *Ascaridia galli*: *a* – dynamics of ozone (O_3), chemical oxygen demand (COD) and helminth concentrations; *b* – disinfection efficiency; *c* – dynamics of damage to the multilayer shell of helminth eggs; *d* – rates of chemical reactions of organic matter oxidation and helminth death

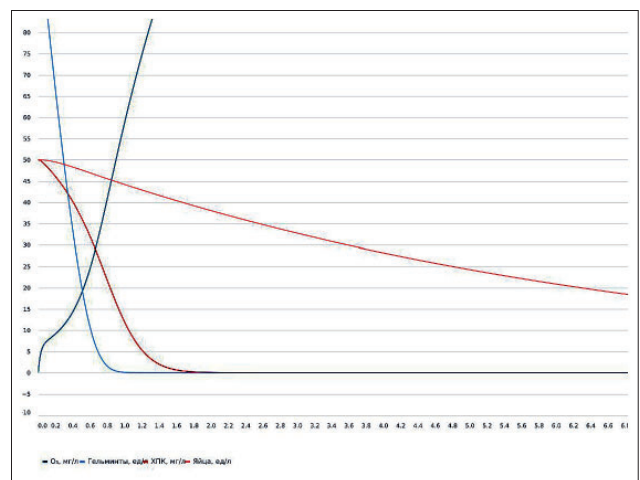


Рис. 4. Динамика изменения ключевых параметров в процессе озоновой обработки: концентрации озона (O_3), численности гельминтов и их яиц, химического потребления кислорода

Fig. 4. Dynamics of key parameters during the ozone treatment process: ozone (O_3) concentration, helminth and egg counts, chemical oxygen demand

(табл.), позволяющий снизить расчетные энергозатраты на 20% с сохранением эффективности.

Table		Таблица	
Сравнение базового и оптимизированного режимов обработки Comparison of basic and optimized treatment modes			
Параметр	Базовый режим	Оптимизированный режим	Экономия
Концентрация О ₃ в воде (C _w), мг/л	125	120	-20%
Время обработки, мин.	14	15	0%
Удельные энергозатраты, Вт·мин.	1050	788	-20%
Эффективность, %	99	99	Без изменений
Минимальная эффективная доза, мг·с/л	105 000	84 000	-25%
Примечание: P _{дис} принята равной 75 Вт			

Результаты подтверждают адекватность разработанных математических моделей и практическую ценность программного комплекса. Возможность решения как прямых (прогноза эффективности), так и обратных (оптимизации параметров) задач обеспечивает эффективность программного комплекса «OzoneSimula» как инструмента для перехода от эмпирического подбора режимов к научно обоснованному проектированию установок озонной обработки в сельском хозяйстве.

Выводы. В процессе исследования разработан, программно реализован и апробирован универсальный программный комплекс «OzoneSimula» для сквозного моделирования и оптимизации процессов озонной дезинвазии. Комплекс интегрирует взаимосвязанные математические модули, описывающие полный технологический цикл: электрогенерацию озона, его массоперенос в водную суспензию и биоцидное действие на целевые организмы.

На примере нематоды *Ascaridia galli* проведена верификация моделей. Установлено, что для достижения 99%-й эффективности обеззараживания суспензии с заданными параметрами необходима минимальная эффективная доза озона ≈105000 мг·с/л, при этом критическое повреждение (около 80%) хитинового слоя яиц наступает через 11-12 минут обработки. Реализованный алгоритм оптимизации на основе метода Нелдера-Мида позволяет получить решение обратной задачи – определить режимы обработки с минимальными энергозатратами. Для рассмотренного сценария предложен оптимизированный режим, снижающий удельные энергозатраты на 20% при сохранении требуемой эффективности.

Библиографический список

1. Нормов Д.А., Азарян А.А., Цедаков А.А. и др. Электроозонная технология очистки навозных стоков: реализация математической модели // *Агроинженерия*. 2024. N5. С. 74-82. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-5-74-82. EDN: YBDBKE.
2. Аширметов А.Х., Мавлянов И.Р., Мавлянов З.И.

О возможности применения озона в лечении covid-19 // *Juvenis scientia*. 2021. N3. С. 5-10. DOI: 10.32415/jsientia_2021_3_5-10. EDN: XPJVQV.

3. Кузин А.В., Шмигель В.В., Шешунова Е.В. Компьютерное моделирование эффективности обработки озонном гельминтов сельскохозяйственных животных (на примере *Ascaridia galli*) // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2025. N2(70). С. 78-86. DOI: 10.35694/YARCX.2025.70.2.012. EDN: QKXSFV.
4. Кузин А.В., Шмигель В.В., Шешунова Е.В. Построение компьютерной симуляции воздействия озона на яйца гельминтов (на примере *Ascaridia galli*) // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2025. N2(70). С. 87-94. DOI: 10.35694/YARCX.2025.70.2.013. EDN: KSFMZJ.
5. Бобков С.П., Астраханцева И.А., Галиаскаров Э.Г. и др. Имитационное моделирование процесса электросинтеза озона // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. N2(78). С. 20-28. DOI: 10.6060/snt.20247802.0008. EDN: RFDSCM.
6. Оськин С.В., Цокур Д.С., Лоза А.З. и др. Обоснование параметров озонатора для озонирования ульев // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. N11(149). С. 94-101. DOI: 10.60797/IRJ.2024.149.36. EDN: EUYBBE.
7. Кольцов Н.И. Законы сохранения химических реакций в закрытом неизотермическом реакторе неполного смешения // *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2024. N7. С. 111-118. DOI: 10.6060/ivkkt.20246707.6976. EDN: LLMIZZ.
8. Цокур Е.С. Компьютерная модель процесса барботирования анолита озонном в анодной камере проточного электролизера воды для получения дезинфицирующих растворов на пасеке // *МНИЖ*. 2025. N3(153). С. 1-7. DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.113. EDN: VWVZMY.
9. Цветков П.С. Кластерный подход к улавливанию и транспортировке промышленного CO₂: экономия за счет совместной инфраструктуры // *Записки Горного института*. 2025. Т. 275. С. 110-129. EDN: XPAQUN.

References

1. Normov D.A., Azaryan A.A., Tsedyakov A.A., et al. Electro-ozonization technology of manure effluent treatment: mathematical model implementation of al. *Agricultural engineering*. 2024. N5. 74-82 (Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2024-5-74-82. EDN: YBDBKE.
2. Ashirmetov A.H., Mavlyanov I.R., Mavlyanov Z.I. On the possibility of using ozone in the treatment of COVID-19. *Juvenis scientia*. 2021. N3. 5-10 (Russian). DOI: 10.32415/jscientia_2021_3_5-10. EDN: XBOFHB.
3. Cuzin A.V., Shmigel V.V., Sheshunova E.V. Computer modeling of efficiency of the ozone treatment of helminths of farm animals (using the example of *Ascaridia galli*). *Bulletin of Agroindustrial complex of the Upper Volga region*. 2025. N2(70). 78-86 (Russian). DOI: 10.35694/YARCX.2025.70.2.012. EDN: QKXSFV.
4. Cuzin A.V., Shmigel V.V., Sheshunova E.V. Construction of a simulation of the effect of ozone on helminth eggs (using the example of *Ascaridia galli*). *Bulletin of agroindustrial complex of the Upper Volga region*. 2025. N2(70). 87-94 (Russian). DOI: 10.35694/YARCX.2025.70.2.013. EDN: KSSFVZJ.
5. Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A., Galiaskarov E.G., et al. Imitation modeling of the ozone electrosynthesis process. *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2024. N2(78). 20-28 (Russian). DOI: 10.6060/snt.20247802.0003. EDN: RFDSKM.
6. Oskin S.V., Tsokur D.S., Loza A.Z., et al. Substantiation of ozonator parameters for hive ozonization. *International research journal*. 2024. N11(149). 94-101 (Russian). DOI: 10.60797/IRJ.2024.149.36. EDN: EUYBBE.
7. Koltsov N.I. Conservation laws of chemical reactions in a closed nonisother reactor of incomplete mixing. *Proceedings of the universities. Chemistry and chemical technology*. 2024. N7. 111-118 (Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246707.6976. EDN: LLMIZZ.
8. Tsokur E.S. Computer model of the process of anolyte bubbling with ozone in the anode chamber of a flow-through water electrolyser for producing disinfectant solutions in an apiary. *International research journal*. 2025. N3(153). 1-7 (Russian). DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.113. EDN: VWVZMY.
9. Tsvetkov P.S. A cluster approach to industrial CO₂ capture and transportation: cost savings through shared infrastructure. *Journal of mining institute*. 2025. Vol. 275. 110-129 (Russian). EDN: XPAQUN.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Кузин А.В. – концепция исследования, разработка математических моделей и программного кода, проведение численных экспериментов, анализ и интерпретация результатов, подготовка рукописи, создание графических материалов;

Шмигель В.В. – научное руководство, обсуждение концепции работы, консультации по методологии, общая редакция текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Cuzin A.V. – research concept, development of mathematical models and software code, conducting numerical experiments, analysis and interpretation of results, manuscript preparation, creation of graphic materials;

Shmigel V.V. – scientific supervision, discussion of the work concept, methodological consultations, general text editing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 01.04.2026

Статья принята к публикации 26.05.2026



Разработка лабораторной СВЧ-установки для термообработки субпродуктов

Дмитрий Витальевич Поручиков,
научный сотрудник, e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. По данным Росстата, в 2024 году в России было произведено 12220 тысяч тонн мяса и субпродуктов, что свидетельствует о положительной динамике в отрасли и обуславливает актуальность разработки эффективных методов переработки. Ускорение процессов при термообработке субпродуктов при массировании в условиях фермерских хозяйств с сохранением потребительских свойств и снижением эксплуатационных затрат является актуальной научной задачей. (Цель исследования) Разработать лабораторную СВЧ-установку для термообработки субпродуктов на агропредприятиях. (Материалы и методы) Для реализации поставленной цели в программе Компас-3D V17 выполнено трехмерное моделирование объемных резонаторов различного конструкционного исполнения – стержневого цилиндра, трубчатого цилиндра и цилиндрической емкости с перемешивающим механизмом. Для каждой конструкции разработаны операционно-технологические схемы. (Результаты и обсуждение) Наиболее эффективным признан цилиндрический щелевой резонатор-барабан из стержней, размещенный в цилиндрическом экранирующем корпусе, что обеспечивает электромагнитную безопасность. Источником возбуждения электромагнитного поля служит магнетрон воздушного охлаждения, установленный с открытого торца барабана. Возбуждение в коаксиальном резонаторе происходит за счет излучения через щели, что позволяет повторно использовать электромагнитную мощность. Определены расчетные режимы работы лабораторной установки: производительность – 10 килограммов в час, удельная мощность – 1,6 ватта на грамм, продолжительность обработки – один час при концентрации соли 12,88 процента, удельные энергетические затраты – 0,165 киловатт-часа на килограмм, частота вращения резонатора-барабана – 23 оборота в минуту. (Выводы) Предложенная технология, объединяющая массирование и термообработку в едином цикле, позволяет ускорить технологический процесс, улучшить впитывание посолочных веществ и получить продукт с улучшенными потребительскими характеристиками.

Ключевые слова: сверхвысокочастотная установка, лабораторный образец, термообработка субпродуктов, мясомассажер.

Для цитирования: Поручиков Д.В. Разработка лабораторной СВЧ-установки для термообработки субпродуктов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 9-17. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-9-17. EDN: CRBEYL.

Scientific article

Development of a Laboratory Microwave Installation for Heat Treatment of by-products

Dmitry V. Poruchikov,
researcher, e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. According to Rosstat, in 2024, 12,220 thousand tons of meat and offal were produced in Russia, which indicates a positive dynamic in the industry and determines the relevance of developing effective

processing methods. Acceleration of processes during heat treatment of by-products during massaging in farm conditions with preservation of consumer properties and reduction of operating costs is an actual scientific task. (Research Purpose) The research purpose is developing a laboratory microwave unit for the heat treatment of by-products at agricultural enterprises. (Materials and methods) To achieve this goal, the Compass-3D V17 program performed three-dimensional modeling of volumetric resonators of various designs – a rod cylinder, a tubular cylinder and a cylindrical container with a mixing mechanism. Operational and technological schemes have been developed for each design. (Results and discussion) The most effective one is a cylindrical slot resonator – a drum of rods placed in a cylindrical shielding housing, which ensures electromagnetic safety. The source of excitation of the electromagnetic field is an air-cooled magnetron installed at the open end of the drum. Excitation in the coaxial resonator occurs due to radiation through the slits, which makes it possible to reuse electromagnetic power. The calculated modes of operation of the laboratory unit are determined: productivity – 10 kilograms per hour, specific power – 1.6 watts per gram, processing time – one hour at a salt concentration of 12.88 percent, specific energy expenditure – 0.165 kilowatt-hours per kilogram, rotation frequency of the resonator drum – 23 revolutions per minute. (Conclusions) The proposed technology, combining massaging and heat treatment in a single cycle, makes it possible to speed up the technological process, improve the absorption of salting substances and obtain a product with improved consumer characteristics.

Keywords: microwave installation, laboratory prototype, heat treatment of by-products, meat massager.

For citation: Poruchikov D.V. Development of a laboratory microwave installation for heat treatment of by-products. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 9-17 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-9-17. EDN: CRBEYL.

Российский агропромышленный комплекс (АПК) демонстрирует устойчивую динамику роста, которая проявляется в увеличении производства основных видов продукции. По итогам 2024 года объём производства мяса и субпродуктов составил рекордные 12,22 млн тонн, увеличившись на 3% относительно данных предыдущего года [1]. В то же время рост производства требует не только наращивания производственных мощностей, но и акцента на задачах по комплексной и глубокой переработке сырья. Особую актуальность приобретает проблема рационального использования субпродуктов – ценного источника натуральных белков (15-19%) и жиров (до 12%), – значительная часть которых реализуется без дополнительной переработки, что снижает экономическую эффективность сектора.

Вместе с тем одним из перспективных направлений повышения добавленной стоимости является выпуск готовой к употреблению продукции, например, вареных субпродуктов. Таким образом, возникает актуальная научно-техническая задача: разработать метод ускоренной термообработки, который позволил бы получать продукт с высокими потребительскими свойствами (сохранением сочности и питательной ценности) при сокращении времени обработки и снижении эксплуатационных затрат, что особенно важно для малых и средних предприятий, включая фермерские хозяйства.

Один из вариантов решения этой проблемы – применение инновационных методов нагрева. Многочисленные исследования (как отечественные, так и зарубежные) убедительно доказывают, что использование энергии электромагнитных волн сантиметрового диапазона (СВЧ-нагрева) является мощным инструментом интенсификации технологических процессов в АПК, повышающим энергоэффективность производства [2-4]. Принципиальное отличие СВЧ-нагрева – объёмное и быстрое воздействие, что позволяет стремительно повысить энергоэффективность производства за счёт сокращения времени обработки и минимизации потерь энергии в окружающую среду, в том числе интенсифицируя процесс термообработки при массажировании [5-7].

Появлению новых областей использования СВЧ-установок в АПК способствуют особые специфические параметры электромагнитных колебаний волн сантиметрового диапазона (2450 МГц, 12,24 см) [3, 5].

Цель исследования – разработать лабораторную СВЧ-установку для термообработки мясного сырья агропредприятий на примере субпродуктов.

В связи с этим необходимо осуществить решение следующих научных задач:

1. Разработать 3D-модели установок с СВЧ-энергоподводом, используя различные конструкционные исполнения рабочих камер путем теоретического анализа, компьютерного моделирования

и инженерной оптимизации всех узлов установки, в том числе системы ввода-вывода сырья.

2. Разработать лабораторную СВЧ-установку для массирования и термообработки субпродуктов на агропредприятиях.

3. Определить режимы термообработки субпродуктов для обоснованного конструкционного исполнения установки с СВЧ-энергоподводом.

Материалы и методы. Трехмерное моделирование объемных резонаторов разного конструкционного исполнения проводили в программе Компас-3D V17.

Методология предусматривает системный подход к изучаемому вопросу, в связи с этим при разработке СВЧ-установки применяли за основу следующий алгоритм:

- проектирование СВЧ-установок с получением аналитических и эмпирических закономерностей, описывающих процесс термообработки;

- выбор конфигурации резонаторов;

- выбор магнетронов воздушного охлаждения сантиметрового диапазона частоты и их месторасположения с учетом направления излучателей через поверхность резонаторов, требующих оптимизации с целью исключения взаимного влияния генераторов друг на друга и повышения тепловых нагрузок, пробоев, выхода магнетронов из строя;

- выбор системы контроля, регулирования и управления технологическим процессом термообработки сырья.

Совокупность условий к разработке СВЧ-установок для термообработки мясного сырья включает:

- эффективное конструкционное исполнение (использование стандартных узлов и деталей; возможность регулирования энергетической нагрузки, экспозиции и согласования нагрузки с мощностью генераторов; контроль технологических параметров и автоматизация процесса термообработки; удобство монтажа узла; ремонтпригодность);

- критерии к эксплуатационным показателям (надежность и безопасность при функционировании; соблюдение электромагнитной безопасности; исключение пробоев и возгораний; долговечность).

Результаты и обсуждение. Разработка СВЧ-установок для термообработки субпродуктов подразумевает проектирование конструкционного исполнения резонатора таким образом, чтобы внутри него диэлектрический нагрев оставался неизменным в любой части объема сырья (мясного сырья с рассолом) [7]. Объем резонатора должен обеспечивать требуемую загрузку сырья (производительность 10 кг/ч). При линейных размерах резонатора в 5-6 раз больше длины волны генератора (12,24; 12,63;

32,78 см) резонансная частота зависит от его размеров и конфигурации [8]. Равномерность электромагнитного поля в резонаторе будет соблюдаться и при незначительном заполнении сырьем.

Оптимизация конфигурации, размеров и параметров объемных резонаторов заключается в выборе конструкционного исполнения и размеров, при которых возможно возбуждать исключительно определенные виды колебаний, а интерференция между ними обеспечивала бы равномерное электромагнитное поле (ЭМП) по объему резонатора. Научно-технические аспекты разработки установок с СВЧ-энергоподводом для термообработки сырья агропредприятий приведены в *таблице 1*.

Применение СВЧ-нагрева сельскохозяйственного сырья позволяет существенно повысить производительность установок. Вместе с тем сложность экранирующих конструкций, неравномерность нагрева по толщине сырья и электрические пробой при его высокой влажности – основные их недостатки. Не добившись равномерности выделения тепла по сечению, выравнивание температуры будет происходить за счет теплопроводности, а чтобы избежать перегрев областей с сильным электрическим полем, может потребоваться снижение мощности СВЧ-генератора и увеличение продолжительности нагрева.

Одновременно разработаны СВЧ-установки для термообработки мясного сырья в процессе массирования, в них реализованы объемные резонаторы разных нетрадиционных конструкционных исполнений: в виде стержневого и трубчатого цилиндров и цилиндрической емкости с перемешивающим механизмом.

1. Установка с СВЧ-энергоподводом в стержневой цилиндрический резонатор для термообработки мясного сырья в процессе массирования (*рис. 1*).

СВЧ-установка циклического действия для термообработки мясного сырья содержит цилиндрический экранирующий корпус, внутри которого соосно установлен открытый цилиндрический резонатор с внутренними ребрами. Резонатор съемный с разной конфигурацией отверстий перфорации или в виде беличьей клетки [10-12].

При доминировании в сырье жидкой фракции рекомендуется устанавливать перфорированный резонатор с отверстиями малого диаметра, а при термомеханической обработке кускового мясного сырья – использовать резонатор в виде беличьей клетки [9]. Операционно-технологическая схема термообработки субпродуктов с помощью СВЧ-установки периодического действия приведена на *рисунке 2* [10]. Объем рассола (с концентрацией со-

Table 1		Таблица 1
Научно-технические основы разработки СВЧ-установок для термообработки субпродуктов Scientific and technical foundations for the development of microwave units for thermal processing of by-products		
Лабораторная СВЧ-установка с определенной мощностью и напряженностью электрического поля для реализации эффективного температурного режима термообработки субпродуктов для агропредприятий	СВЧ-генераторы с магнетронами воздушного охлаждения	Частота электромагнитного поля 2450, 2375, 915 МГц, выходная мощность в непрерывном режиме около 1 кВт, срок службы не менее 5 тыс. ч, надежность эффективной работы при переменной нагрузке
	Объемные резонаторы с разными конструкционными исполнениями	В виде стержневого цилиндра, в виде трубчатого цилиндра, в виде цилиндрической емкости с перемешивающим механизмом
	Узлы для равномерного распределения ЭМП в резонаторе	Магнетроны одинаковой частоты или работающие на близких частотах, излучатели которых направлены в один резонатор
	Способы достижения равномерного нагрева сырья	Согласование глубины проникновения волны в сырье с размерами сырья; применение перемешивающих механизмов; передвижение сырья через резонатор; соблюдение скажности технологического процесса менее 0,5; использование магнетронов, работающих на близких частотах
	Способы обеспечения высокой напряженности ЭП в резонаторе для обеззараживания сырья	Интерференция волн при использовании более двух магнетронов
	Способы достижения высокой собственной добротности резонатора	Удвоенное отношение объема, в котором запасается энергия ЭМП, к объему, в котором она расходуется, т.е. к объему, занимаемому поверхностным слоем во всех стенках резонатора. Оценка отношения объема к площади поверхности резонатора для достижения высокого термического КПД (0,6-0,7)

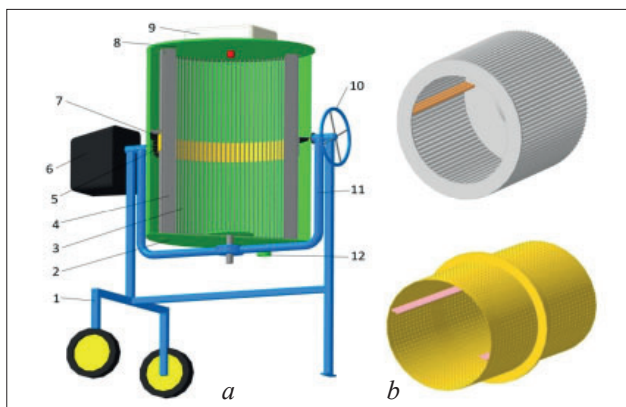


Рис. 1. СВЧ-установка для термообработки мясного сырья в процессе массирования: *a* – 3D-модель установки; *b* – варианты съемных цилиндрических резонаторов: в виде беличьей клетки и перфорированный; 1 – передвижная рама; 2 – цилиндрический экранирующий корпус; 3 – цилиндрический открытый резонатор-барабан; 4 – внутренние ребра; 5 – ведущая шестерня; 6 – мотор-редуктор; 7 – зубчатый венец; 8 – крышка корпуса; 9 – генераторный блок; 10 – стопор; 11 – поворотная рама для опоры и изменения угла наклона установки; 12 – сливной патрубок

Fig. 1. Microwave unit for heat treatment of raw meat during massaging: *a* – 3D-model of the unit; *b* – variants of removable cylindrical resonators, in the form of a squirrel cage and perforated; 1 – mobile frame; 2 – cylindrical shielding housing; 3 – cylindrical open resonator-drum; 4 – internal ribs; 5 – drive gear; 6 – gear motor; 7 – ring gear; 8 – housing cover; 9 – generator unit; 10 – stopper; 11 – rotating frame for support and changing the inclination angle of the unit; 12 – drain pipe



Рис. 2. Операционно-технологическая схема термообработки мясного сырья в установке с цилиндрическим резонатором-барабаном для работы в периодическом режиме

Fig. 2. Operational and technological scheme of heat treatment of meat raw materials in an installation with a cylindrical drum resonator for operation in a periodic mode

ли в нем) зависит от объема резонатора, вида обрабатываемого сырья, длительности и температуры хранения продукта. Регулирование технологических параметров обеспечивает возможность максимально точно подобрать режим обработки для каждого вида исходного сырья. Установка содержит элементы контроля и управления: тумблеры включения, индикаторные лампы, датчики температуры [9]. Преимущество данной установки – уменьшение габаритных размеров, возможность контроля и изменения

режимных параметров, обеспечение стабильности параметров в процессе эксплуатации и воздействия внешних факторов, расширение линейки выпускаемой продукции и т.п. [9].

2. Установка с СВЧ-и ИК-энергоподводом к резонатору-барабану из труб с теплоносителем, обеспечивающая термомеханическое воздействие на мясное сырье (рис. 3).

Установка содержит в цилиндрическом экранирующем корпусе 1 резонаторную камеру 3 в виде беличьей клетки, собранной из труб, с торца которой направлен излучатель от генераторного блока 5 с магнетроном.

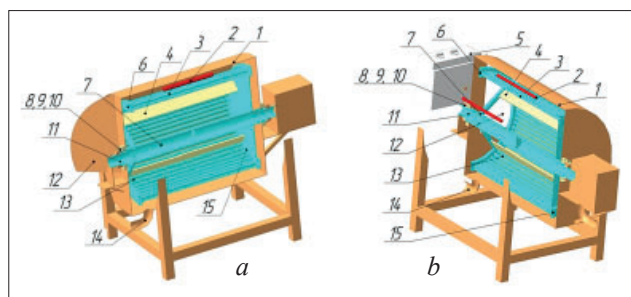


Рис. 3. Установка с СВЧ- и ИК-энергоподводом к резонатору-барабану из труб с теплоносителем, обеспечивающая термомеханическое воздействие на мясное сырье: 1 – экранирующий корпус; 2 – лампы-гриль; 3 – резонаторная камера в виде беличьей клетки; 4 – лопасти; 5 – генераторный блок; 6 – кольцевая труба; 7 – полый вал; 8 – подшипниковый узел; 9 – диэлектрическая прокладка; 10 – стопорная гайка; 11 – муфта; 12 – люк; 13 – щель между трубами; 14 – сливной патрубкок; 15 – полый диск

Операционно-технологическая схема посола и термообработки мясного сырья приведена на рисунке 4.

Массирование сырья под воздействием ЭМП СВЧ влияет на процесс перераспределения посолочных веществ так же, как и при механическом воздействии. Эффект дополнительно усиливается из-за появления при электромеханическом воздействии микроразрывов в ткани, что повышает ее проницаемость [9].

Пространственное изображение СВЧ-установки для посола, массирования и термообработки мясного сырья в упрощенном виде [12, 13], разработанное по аналогии охладителя творога, приведено на рисунке 5.

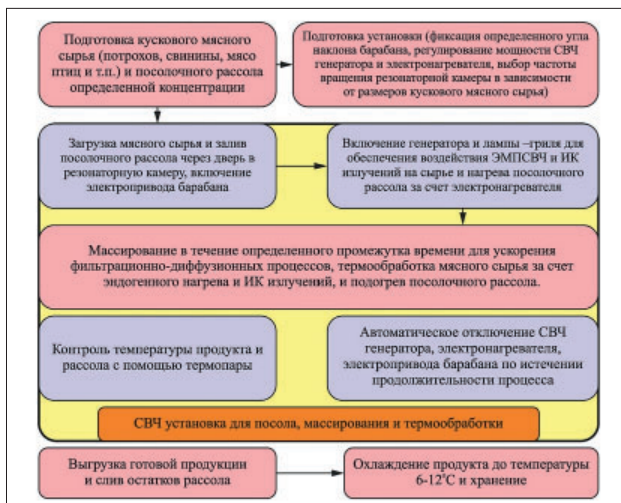


Рис. 4. Операционно-технологическая схема посола и термообработки мясного сырья

Fig. 4. Operational and technological scheme of salting and heat treatment of meat raw materials

Схема процесса термообработки мясного сырья в процессе массирования в рассоле [9] с использованием трубчатого резонатора представлена на рисунке б.

Под экранирующим корпусом в верхней части установлены лампы-гриль в сеточном экране [12].

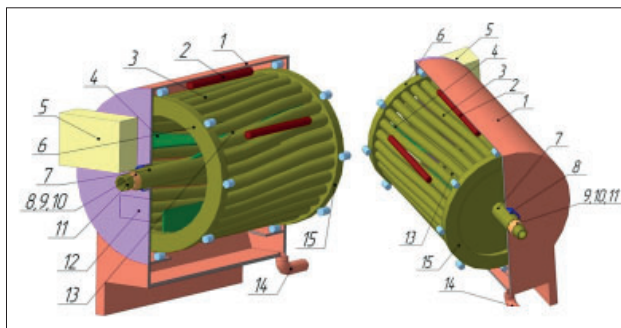


Рис. 5. Резонаторная камера: 1 – цилиндрический экранирующий корпус; 2 – лампы-гриль; 3 – трубчатая резонаторная камера; 4 – лопасти; 5 – генераторный блок; 6 – кольцевая труба; 7 – полый вал; 8 – подшипниковый узел; 9 – диэлектрическая прокладка; 10 – стопорная гайка; 11 – муфта; 12 – люк; 13 – щель между трубами; 14 – сливной патрубкок; 15 – задняя стенка резонаторной камеры

Fig. 5. Resonator chamber: 1 – cylindrical screen housing; 2 – grill lamps; 3 – tubular resonator chamber; 4 – blades; 5 – generator block; 6 – ring pipe; 7 – hollow shaft; 8 – bearing unit; 9 – dielectric gasket; 10 – lock nut; 11 – coupling; 12 – hatch; 13 – gap between pipes; 14 – drain pipe; ; 15 – back wall of the resonator chamber

При этом эффект фильтрационно-диффузионного распределения посолочных веществ в сырье зависит от [10]:

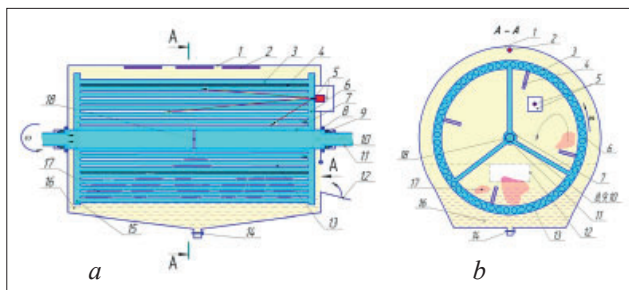


Рис. 6. Схема процесса термообработки мясного сырья в процессе массирования в рассоле с использованием трубчатого резонатора: *a* – вид сбоку (в разрезе); *b* – поперечный разрез установки; 1 – цилиндрический экранирующий корпус; 2 – лампы-гриль; 3 – трубчатая резонаторная камера; 4 – ребра; 5 – СВЧ-генераторный блок; 6 – кольцевая труба; 7 – полый вал; 8 – подшипниковый узел; 9 – диэлектрическая прокладка; 10 – стопорная гайка; 11 – муфта; 12 – люк; 13 – щель между трубами; 14 – сливной патрубков, 15 – полый диск; 16 – рассол; 17 – мясное сырье, 18 – перегородка

Fig. 6. Scheme of the process of heat treatment of raw meat during massaging in brine using a tubular resonator: *a* – side view (sectional view); *b* – cross-section of the unit; 1 – cylindrical shielding body; 2 – grill lamps; 3 – tubular resonator chamber; 4 – fins; 5 – microwave generator block; 6 – annular pipe; 7 – hollow shaft; 8 – bearing unit; 9 – dielectric gasket; 10 – lock nut; 11 – coupling; 12 – hatch; 13 – gap between pipes; 14 – drain pipe, 15 – hollow disk; 16 – brine; 17 – raw meat, 18 – partition

- разности концентрации соли в системе «рассол-сырье»;
- разности диэлектрических свойств компонентов рассола и сырья;
- вязкости рассола и размеров частиц, входящих в рассол;
- параметров ЭМП СВЧ (удельной мощности генератора, величины напряженности электрического поля и длительности воздействия) [9].

3. СВЧ-установка с цилиндрическим резонатором и перемешивающим механизмом для субпродуктов (рис. 7).

Разработанная СВЧ-установка с резонатором, выполненным в виде параллелепипеда с полукруглым основанием, для варки мясного сырья высокой влажности (мяса и субпродуктов) работает следующим образом. Влажное мясное сырье (птичьего сердца с кровью убойных животных и солью) загружают в резонаторную камеру, в которой установлена лопастная мешалка из фторопласта, закрывают крышкой с закрепленным на ней магнетроном. Объем комбинированного мясного сырья занимает не более 35-40% от объема резонатора [14].

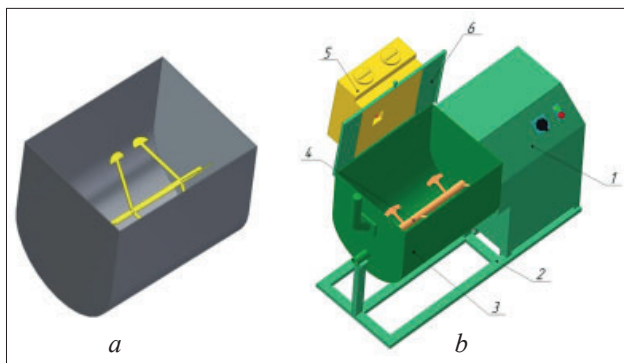


Рис. 7. СВЧ-установка для термообработки субпродуктов высокой влажности: *a* – общий вид установки; *b* – объемный резонатор с лопастной мешалкой; 1 – шкаф управления; 2 – станина; 3 – резонаторная камера; 4 – лопастная мешалка; 5 – СВЧ-генератор; 6 – крышка

Fig. 7. Microwave installation for heat treatment of high-moisture by-products: *a* – general view of the installation; *b* – volumetric resonator with a paddle stirrer; 1 – control cabinet; 2 – frame; 3 – resonator chamber; 4 – paddle stirrer; 5 – microwave generator, 6 – cover

При включении СВЧ-генератора и электропривода мешалки сырье под воздействием ЭМП СВЧ подвергается равномерному нагреву и варке [15, 16]. По истечении выдержки времени СВЧ-генератор выключается, открывается крышка, и готовый вязкий продукт выгружается в приемную емкость.

С наиболее эффективным конструкционным исполнением выбран цилиндрический щелевой резонатор-барабан, выполненный из стержней и размещенный в цилиндрическом экранирующем корпусе. На основе проведенного анализа и представленных данных разработан и изготовлен лабораторный образец СВЧ-установки с щелевым резонатором-барабаном (рис. 8).

Установка выполнена в виде соосно расположенных двух резонаторов – внутреннего щелевого резонатора-барабана и резонатора, представленного как коаксиальный резонатор между экранирующим корпусом и щелевым резонатором-барабаном. Источником возбуждения ЭМП СВЧ внутреннего щелевого резонатора-барабана является магнетрон воздушного охлаждения, установленный с открытого торца барабана, а возбуждение ЭМП СВЧ в коаксиальном резонаторе происходит за счет электромагнитного излучения через щели резонатора-барабана [11]. Происходит повторное использование энергии (осуществляется рекуперация энергии) через щелевой резонатор и сохранение в области рассола суммарного электромагнитного поля в виде бегущей волны. В коаксиальном резонаторе волна электромагнитного поля представляет собой волну,

распространяющуюся в одном направлении. Эту функцию для электромагнитного поля необходимой структуры и представляет резонансная система, в которой электромагнитные волны достигают области «сырьё-рассол». Наличие кольцевого объема между щелевым резонатором-барабаном и экранирующим корпусом создает условия для рекуперации (повторного и многократного использования) электромагнитной энергии, излучаемой системой первичных источников [11].

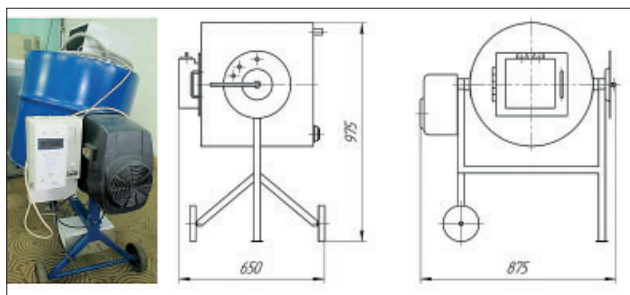


Рис. 8. Лабораторный образец СВЧ-установки (с габаритными размерами) с щелевым резонатором-барабаном для термообработки субпродуктов

Fig. 8. Laboratory prototype of a microwave installation (with overall dimensions) with a slotted resonator-drum for heat treatment of raw meat

Конструкция лабораторной вращающейся СВЧ-установки (с ее габаритными размерами) формирует условия и параметры для высокоинтенсивной обработки мясных продуктов. Проведенный анализ существующих технических средств позволил определить проектные режимы, в результате в качестве базовых были приняты следующие параметры: производительность – 10 кг/ч при удельной мощности воздействия около 1,6 Вт/гр продукта. Барабан при этом должен совершать 23 об/мин, а предполагаемое время работы должно составлять примерно один час. Ожидаемый экономический эффект конструкции – прогнозируемое снижение энергопотребления, а удельные затраты энергии изменятся с 0,29 до 0,16-0,2 кВт·ч/кг [11].

Выводы. Обработка мясного сырья (особенно субпродуктов) неизменно представляет собой сложные тенденции в развитии пищевой промышленности. Применяемые в настоящее время методы, совмещающие механический массаж с конвекционным нагревом, имеют существенные ограничения, препятствующие росту эффективности производства и улучшению качества продукции. В этой связи перед инновационной агроинженерией возникает ключевая задача создания безопасных ресурсосберегающих и гибких установок, позволяющих объединить

процессы посола и термообработки в единый цикл, гарантируя эффективное управление и воспроизводимость стандартов качества готового продукта.

В результате анализа существующих технологий термообработки и конструкций мясомассажёров для производства вареных мясных изделий разработан инновационный принцип интенсификации массообменных процессов в субпродуктах. Основная идея – в совмещении процессов термообработки и массажирования субпродуктов в рассоле, что позволяет ускорить накопление посолочных веществ и снизить энергозатраты. Реализация данной идеи осуществлена в оригинальной конструкции – экранирующем цилиндре с щелевым резонатором-барабаном, в котором за счёт дифракционного излучения в кольцевом объёме возбуждается электромагнитное поле сверхвысоко-частотного диапазона, обеспечивающее эндогенный нагрев рассола без прямого контакта между боковой стенкой и основаниями. В процессе проектирования были созданы 3D-модели стержневого цилиндра, трубчатого цилиндра, цилиндрической ёмкости с перемешивающим механизмом. Тем не менее цилиндрический щелевой резонатор-барабан из стержней в экранирующем корпусе признан оптимальным решением. Его эффективность обусловлена большим объёмом накопленной энергии и минимальными потерями (отсутствием диэлектрических потерь и потерь на излучение), а также потерями, связанными с минимальной электропроводностью благодаря значительной площади проводящей поверхности неферромагнитного резонатора.

Разработана и изготовлена лабораторная СВЧ-установка с щелевым резонатором-барабаном, полученные параметры полностью соответствуют проектным ожиданиям.

Использование массажирования в сочетании с впитыванием посолочных веществ ускоряет термообработку субпродуктов и дает возможность получить продукт с улучшенными потребительскими свойствами.

Библиографический список

1. Новикова Г.В., Сторчевой В.Ф., Просвирякова М.В. и др. Научно-технические основы разработки установок с СВЧ-энергоподводом для переработки сырья агропредприятий // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. N70(1). С. 18-27. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-18-27. EDN: DVVZVK.
2. Adhikari A.R., Chipara M. A recent development trend in microwave radiation-based material engineering.

- Polymer Bulletin*. 2024. N81. С.1-20. DOI: 10.1007/s00289-023-05119-3. EDN: FJXEVR.
3. Urugo M.M., Emire S.A., Tringo T.T. Microwave Processing of Food and Biological Materials: Principles and Various Processing Applications. *Croatian Journal of Food Science and Technology*. 2021. N13(2). С. 253-267. DOI: 10.17508/CJFST.2021.13.2.07.
 4. Lukina D., Belov V., Lukina O. et al. Increasing the Efficiency of the Operation of the Facilities for the Thermal Processing of Raw Materials by Exposure to Electromagnetic Radiation. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 781. 185-189. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.781.185. EDN: RIDSPW.
 5. Михайлова О.В., Новикова Г.В., Просвирякова М.В. и др. Особенности разработки установок с СВЧ-энергоподводом для переработки сырья агропредприятий // *Вестник НГИЭИ*. 2022. N12(139). С. 54-65. DOI: 10.24412/2227-9407-2022-12-54-65. EDN: JEENXA.
 6. Белова М.В., Уездный Н.Т., Ершова И.Г. Экономическая эффективность применения СВЧ-установки для термообработки субпродуктов // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева*. 2013. N4-2(80). С. 35-38. EDN: RSCBXD.
 7. Mao Z. Basic Principles of Microwave Communication. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. N1885. 022062. DOI: 10.1088/1742-6596/1885/2/022062. EDN: YYXXZ.
 8. Сивяков Б.К., Григорьян С.В. Математическое моделирование многоволновой СВЧ установки для сушки продуктов // *Вопросы электротехнологии*. 2019. N4(25). С. 5-11. EDN: ZTXFUW.
 9. Жданкин Г.В., Новикова Г.В., Поручиков Д.В. Совершенствование установки для массирования и термообработки мясного сырья // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. N3(24). С. 58-62. EDN:LSLWOL.
 10. Ершова И.Г., Поручиков Д.В. Повышение эффективности функционирования мясомассажера с источниками сверхвысококачественной энергии при термообработке сырья // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N1(30). С. 34-45 EDN: ZAWQAX.
 11. Поручиков Д.В., Просвирякова М.В., Ларионов Г.А. и др. Технология совмещения процессов посола и термообработки субпродуктов в сверхвысококачественной установке // *Аграрная наука*. 2022. N(11). С. 103-109. DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-103-109. EDN: HGSBMH.
 12. Поручиков Д.В., Белова М.В., Михайлова О.В. и др. Мясомассажер с источником ЭМП СВЧ для варки мелкокускового мясного сырья // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N2(35). С. 97-102. EDN: RGNDMZ.
 13. Поручиков Д.В., Просвирякова М.В., Тихонов А.А. и др. Микроволновая установка для термообработки мышечных желудков птиц в непрерывном режиме // *Тракторы и сельхозмашины*. 2024. Т. 91. N6. С. 834-842. DOI: 10.17816/0321-4443-629341. EDN: FZAHNG.
 14. Воронов Е.В., Суслов С.А., Новикова Г.В. и др. СВЧ установки для термообработки субпродуктов жвачных животных // *Сельский механизатор*. 2024. N2. С. 26-27. DOI: 10.47336/0131-7393-2024-2-26-27. EDN: OGIRBF.
 15. Воронов Е.В., Новикова Г.В., Суслов С.А. и др. Микроволновая установка с щелевым цилиндрическим резонатором для вытопки жира из мясных отходов // *АПК России*. 2024. Т.31. N2. С. 196-205. DOI: 10.55934/2587-8824-2024-31-2-196-205. EDN: VNLVMQ.
 16. Риттер Е., Савостин А., Риттер Д. и др. Повышение равномерности распределения электромагнитного поля в микроволновых зерносушилках // *Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. 2024. Т. 130. N1. С. 395-403. DOI: 10.52167/1609-1817-2024-130-1-395-403. EDN: GXUUA.

References

1. Novikova G.V., Storchevoy V.F., Prosviryakova M.V. et al. Scientific and technical basis for the development of installations with microwave power supply for processing raw materials at agricultural enterprises. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023. N70(1). 18-27 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-18-27. EDN: DVVZVK.
2. Adhikari A.R., Chipara M. A recent development trend in microwave radiation-based material engineering. *Polymer Bulletin*. 2024. N81. С.1-20. DOI: 10.1007/s00289-023-05119-3. EDN: FJXEVR.
3. Urugo M.M., Emire S.A., Tringo T.T. Microwave Processing of Food and Biological Materials: Principles and Various Processing Applications. *Croatian Journal of Food Science and Technology*. 2021. N13(2). С. 253-267. DOI: 10.17508/CJFST.2021.13.2.07.
4. Lukina D., Belov V., Lukina O. et al. Increasing the Efficiency of the Operation of the Facilities for the Thermal Processing of Raw Materials by Exposure to Electromagnetic Radiation. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 781. 185-189. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.781.185. EDN: RIDSPW.
5. Mikhailova O.V., Novikova G.V., Prosviryakova M.V.

- et al. Features of the development of installations with microwave power supply for processing raw materials of agricultural enterprises. *Bulletin of NGIEI*. 2022. N12(139). 54-65 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2022-12-54-65. EDN: JEEHXA.
6. Belova M.V., Uezdny N.T., Ershova I.G. Economic efficiency of application of superhigh heat treatment installation for by-products. *Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I.Ya. Yakovlev*. 2013. N4-2(80). 35-38 (In Russian). EDN: RSCBXD.
7. Mao Z. Basic Principles of Microwave Communication. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. N1885. 022062. DOI: 10.1088/1742-6596/1885/2/022062. EDN: YYXXZ.
8. Sivyakov B.K., Grigoryan S.V. Mathematical modeling of multi-wave microwave installation for drying products. *Issues of Electrical Technology*. 2019. N4(25). 5-11 (In Russian). EDN: ZTXFUW.
9. Zhdankin G.V., Novikova G.V., Poruchikov D.V. Improvement of the installation for massaging and heat treatment of raw meat. *Innovations in Agriculture*. 2017. N3(24). 58-62 (In Russian). EDN:LSLWOL.
10. Ershova I.G., Poruchikov D.V. Increasing the efficiency of the the meat massager with a source of ultra-high-frequency energy during heat treatment of raw materials. *Innovations in Agriculture*. 2019. N1(30). 34-45 (In Russian). EDN: ZAWQAX.
11. Poruchikov D.V., Prosviryakova M.V., Larionov G.A. et al. Technology for combining the processes of salting and heat treatment of by-products in a microwave installation. *Agrarian Science*. 2022. N11. 103-109 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-103-109. EDN: HGSBMH.
12. Poruchikov D.V., Belova M.V., Mikhailova O.V. et al. The massager for meat with an SHF-source for cooking chopped raw meat. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2019. N2(35). 97-102 (In Russian). EDN: RGNDMZ.
13. Poruchikov D.V., Prosviryakova M.V., Tikhonov A.A. et al. Microwave installation for heat treatment of muscular stomachs of birds in continuous mode. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024. N91(6). 834-842 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-629341. EDN: FZAHHG.
14. Voronov E.V., Suslov S.A., Novikova G.V. et al. Microwave installations for heat treatment of ruminant animal by-products. *Rural Mechanizer*. 2024. N(2). 26-27 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2024-2-26-27. EDN: OGIRBF.
15. Voronov E.V., Novikova G.V., Suslov S.A. et al. Microwave installation with a slotted cylindrical resonator for the removal of fat from meat waste. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2024. Vol. 31. N2. 196-205 (In Russian) DOI: 10.55934/2587-8824-2024-31-2-196-205. EDN: VNLVMQ.
16. Ritter E., Savostin A., Ritter D. et al. Increasing the uniformity of distribution of the electromagnetic field in microwave grain dryers. *Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev*. 2024. Vol. 130. N1. 395-403 (In Russian). DOI: 10.52167/1609-1817-2024-130-1-395-403. EDN: GXUUA.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант.

Conflict of interest

The author declare no conflict of interest.
The author read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 03.04.2026

Статья принята к публикации 01.06.2026



Обоснование эксплуатационных параметров лабораторного стенда для фотолюминесцентной диагностики молока

Геннадий Николаевич Самарин,

доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: samaringn@yandex.ru;

Михаил Владимирович Беяков,

доктор технических наук, главный научный сотрудник;

Игорь Юрьевич Ефременков,

младший научный сотрудник

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Для повышения конкурентоспособности агропромышленного комплекса необходимы постоянное внедрение инновационных технологий и цифровых систем, модернизация средств механизации, в том числе в молочном животноводстве. Такие технические решения должны обладать финансовой доступностью для большинства хозяйств, а также высокой эффективностью и относительно простой конструкцией. Указанными преимуществами в большинстве своем обладают оптические методы диагностики. Оптические технические решения (мультиспектральные и спектроскопические методы, наносенсоры) применяют для диагностики жирности и наличия антибиотиков в молоке, выявления мастита на ранних стадиях у сельскохозяйственных животных. (Цель исследования) Обосновать эксплуатационные параметры (необходимый объем пробы, время работы) лабораторного стенда для фотолюминесцентной диагностики молока. (Материалы и методы) Показали, что исследуемая лабораторная установка включает в себя оптический блок с восемью светодиодами со звездобразным положением и четырьмя фотодиодами в центре. Исследовали молоко «Мичурино», имеющее жирность 2,5 процента. (Результаты и обсуждение) Построили для расчета оптимального времени и количества измерений люминесценции молока графики зависимости абсолютной погрешности от количества измерений пробы молока. Рассчитали для нахождения оптимальных параметров режимов работы лабораторного стенда при детектировании антибиотиков в молоке оптимальный объем наливаемого молока в кювету, получили оптимальное количество измерений и время измерений одной пробы молока. (Выводы) Определили оптимальный объем наливаемого молока в кювету, который составляет 17,7 миллилитра. Установили, что для минимальной абсолютной погрешности при получении сигнала люминесценции молока для всех пар светодиод – фотодиод необходимо количество измерений 7000-13 000, при этом время измерений составляет 25-41 секунды. **Ключевые слова:** люминесценция, оптимизация, электрический сигнал, математическая обработка.

Для цитирования: Самарин Г.Н., Беяков М.В., Ефременков И.Ю. Обоснование эксплуатационных параметров лабораторного стенда для фотолюминесцентной диагностики молока // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №2. С. 18-23. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-18-23. EDN: DKHLNN.

Scientific article

Justification of the Operational Parameters of the Laboratory Installation for Photoluminescent Diagnostics of Milk

Gennadiy N. Samarin,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, e-mail: samaringn@yandex.ru;

Mikhail V. Belyakov,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;

Igor Yu. Efremenkov,

junior researcher

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. *To increase the competitiveness of the agro-industrial complex, continuous introduction of innovative technologies and digital systems, modernization of mechanization facilities, including in dairy farming, are necessary. Such technical solutions should have financial accessibility for most farms, as well as high efficiency and relatively simple design. These advantages are mostly possessed by optical diagnostic methods. Optical technical solutions (multispectral and spectroscopic methods, nanosensors) are used to diagnose fat content and the presence of antibiotics in milk, to detect mastitis in the early stages in farm animals. (Research purpose) The research purpose is substantiating the operational parameters (required sample volume, operating time) of a laboratory installation for photoluminescent diagnostics of milk. (Materials and methods) It was shown that the laboratory installation under study includes an optical unit with eight LEDs with a star-shaped position and four photodiodes in the center. Milk «Michurino», having a fat content of 2.5 percent, was examined. (Results and discussion) To calculate the optimal time and number of measurements of milk luminescence, the dependence of the absolute error on the number of measurements of the milk sample were studied. In order to find the optimal parameters of the operating modes of the laboratory stand when detecting antibiotics in milk, the optimal volume of milk poured into the cuvette was calculated, the optimal number of measurements and the measurement time of one milk sample were studied. (Conclusions) The optimal volume of milk in the cuvette was determined, which is 17.7 milliliters. It was found that for the minimum absolute error in receiving the milk luminescence signal for all LED–photodiode pairs, the number of measurements 7000-13 000 is required, while the measurement time is 25-41 seconds.*

Keywords: *luminescence, optimization, electrical signal, mathematical processing.*

For citation: Samarin G.N., Belyakov M.V., Efremkov I.Yu. Justification of the operational parameters of the laboratory installation for photoluminescent diagnostics of milk. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 18-23 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-18-23. EDN: DKHLNN.

Разработка средств механизации и автоматизации в молочном животноводстве должна придерживаться системного подхода и непрерывного развития [1]. Снижение материальных и энергетических затрат, внедрение систем искусственного интеллекта и цифровых технологий необходимы для постоянного повышения конкурентоспособности АПК России [2]. Наиболее целесообразно при производстве молока-сырья внедрение цифровых технологий, особенно при недостатке рабочей силы на селе [3].

Важная составляющая получения качественной, полезной, безопасной продукции – ее контроль на всех технологических этапах производства [4]. Этот контроль можно осуществить с помощью методов, обладающих высокой скоростью и точностью измерений и не разрушающих исследуемую продукцию.

Внедрение данных технологий зависит, прежде всего, от финансовых возможностей различных типов сельскохозяйственных предприятий [5]. Такие технологии должны обладать финансовой доступностью. В большинстве своем указанные преимущества имеют оптические методы диагностики. Оптический экспресс-анализ на ферме можно применять для решения широкого круга задач: коррективировка рациона сельскохозяйственных животных,

диагностика жирности молока, выявление мастита на ранних стадиях, диагностика наличия антибиотиков в молоке и так далее.

Оптическим мультиспектральным методом отслеживалось содержание жира и белка в молоке [6]. Разработан портативный спектрометр, работающий в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, в качестве недорогого решения для анализа качества молока на ферме [7]. С помощью масс-спектропии возможно определение субклинического и клинического мастита у коров в молоке [8]. С использованием оптических наносенсоров выявляли антибиотики в молоке [9]. Также для диагностики антибиотиков в молоке применяли поверхностно-усиленное рамановское рассеяние [10].

Цель исследования – обосновать эксплуатационные параметры (необходимый объем пробы, время работы) лабораторного стенда для фотолумinesцентной диагностики молока.

Материалы и методы. Оптический блок лабораторного стенда имеет круглую форму диаметром 75 мм с четырехгранными креплениями по бокам, звездообразным расположением светодиодов с длинами волн: 250, 265, 320, 362, 385, 424, 445 и 485 нм. В центре оптического блока находятся приемники излучения – фотодиоды со спектральными диапазонами 221-358, 420-675, 440-620, 480-660 нм. Внешний

вид оптического блока представлен на *рисунке 1*.

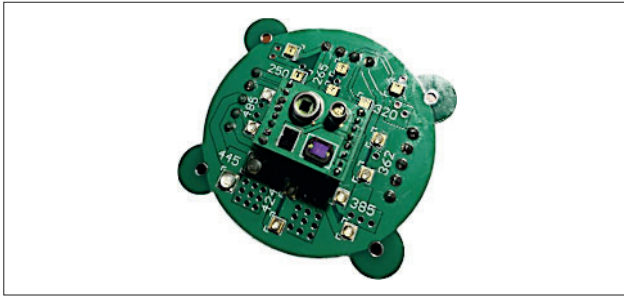


Рис. 1. Оптический блок лабораторного стенда
Fig. 1. Optical unit of the laboratory installation

Оптический блок помещен в светонепроницаемый корпус, в котором размещена кювета для образцов. Блок соединен с электронным блоком и дисплеем для вывода результатов измерений.

С целью нахождения оптимальных параметров режимов работы лабораторного стенда при детектировании антибиотиков в молоке в качестве объекта измерений использовали молоко агрофирмы «Мичурино», имеющее жирность 2,5%. Для этого необходимо экспериментально проверить различия сигнала люминесценции от объема наливаемого молока в кювету. В основном диагностику антибиотиков в молоке осуществляют при сдаивании первых струек (в диапазоне по объему 8-26 мл), следовательно, кювета должна иметь объем в данных пределах. Для равномерной освещенности образца молока при измерениях требуется, чтобы у кюветы был диаметр, равный диаметру оптического блока.

Соответственно объем наливаемого молока в кювету можно рассчитать по формуле:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h, \quad (1)$$

где r – радиус кюветы;

h – высота кюветы. В формуле объем в мм^3 , $1 \text{ мм}^3 = 0,001 \text{ мл}$.

Помимо объема наливаемого молока, также следует выполнить подбор оптимального количества измерений и время измерений люминесценции в рамках одной пробы. Время измерений не должно превышать норматив на подготовительные операции к доению 60 с.

Время одного измерения лабораторного стенда $t_{\text{л.с}}$ вычисляется по формуле:

$$t_{\text{л.с}} = \tau_{\text{длит}} + \tau_{\text{задерж}} + \tau_{\text{м}} + \tau_{\text{з}}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{длит}}$ – время длительности импульса светодиода 19 мкс;

$\tau_{\text{задерж}}$ – время задержки включения фотодиода 1 мкс;

$\tau_{\text{м}}$ – время обработки сигнала с фотодиода мик-

роконтроллером, то есть перевода его из аналоговой формы в цифровую, занимает 3-20 мкс;

$\tau_{\text{з}}$ – время задержки перед новым циклом измерений, которое необходимо, чтобы осуществилось затухание всех процессов люминесценции, данное время не более 2200 мкс. Таким образом, время одного измерения одной пробы молока составляет $t_{\text{л.с}} = 2240 \text{ мкс}$.

Общее время измерений $t_{\text{общ}}$ складывается из времени сдаивания первых струек молока $t_{\text{сд}}$ около 5 с, времени пробоподготовки $t_{\text{проб}}$, которое получено экспериментально и составляет 5, и времени измерения лабораторного стенда $t_{\text{л.с}}$, формула выглядит следующим образом:

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{сд}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{л.с}}. \quad (3)$$

Соответственно время измерения лабораторного стенда $t_{\text{л.с}}$ не должно превышать 50 с.

Ранее было установлено, что молоко чувствительно к возбуждению на длинах волн 324, 360, 445 нм и люминесцирует в диапазонах 350-600, 400-650, 480-680 нм [11].

Результаты и обсуждение. В *таблице* приведены результаты расчетов объема молока в кювете.

Table		Таблица				
Результаты расчета наливаемого молока в кювету						
The results of calculating the amount of milk in the cuvette						
Высота слоя молока в кювете h , мм	1	2	3	4	5	
Объем наливаемого молока в кювету V , мл	4,4	8,8	13,3	17,7	22,1	

Рис. 2. Распределение молока в кювете с объемом:
 a – 4,4 мл; b – 8,8 мл; c – 13,3 мл; d – 17,7 мл

Fig. 2. Milk distribution in a cuvette with a volume of:
 a – 4.4 ml; b – 8.8 ml; c – 13.3 ml; d – 17.7 ml

Из *рисунка 2* следует, что оптимальный объем молока должен составлять не менее 17,7 мл и не должен превышать объема при сдаивании первых струек

молока 26 мл. При меньшем объеме 4,4-13,3 мл имеются области на кювете, не заполненные молоком, более того наблюдается просвечивание дна кюветы сквозь молоко, что может существенно повлиять на итоговые измерения.

На рисунке 3 представлены результаты измерения сигнала люминесценции молока на стенде с добавлением определенного количества антибиотика.

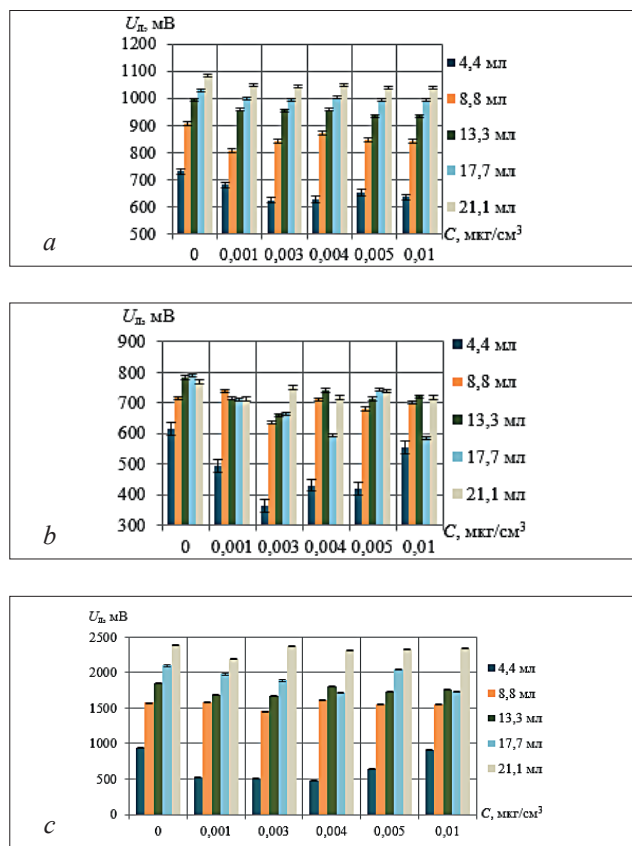


Рис. 3. Результаты измерений сигналов U_L , мВ, молока от различной концентрации антибиотика: *a* – светодиод 320 нм, фотодиод *BPW21R*, 420-675 нм; *b* – светодиод 362 нм, фотодиод *VEMD 5510CF*, 440-620 нм; *c* – светодиод 362 нм, фотодиод *Hamamatsu s7686*, 480-660 нм

Fig. 3. Measurement results of the U_L , mV, milk signals from different concentrations of the antibiotic: *a* – 320 nm LED, *BPW21R* photodiode, 420-675 nm; *b* – 362 nm LED, *VEMD 5510CF* photodiode, 440-620 nm; *c* – 362 nm LED, *Hamamatsu s7686* photodiode, 480-660 nm

Из рисунка 3 видно, что отличие в сигнале люминесценции между минимальным объемом 4,4 мл и максимальным 21,1 мл составляет практически в 2 раза, следовательно, распределение молока по кювете и его объем значительно влияют на сигнал люминесценции. Одновременно для трех пар светодиод – фотодиод целесообразно использовать

объем молока, равный 17,7 мл, поскольку при таком объеме отличия в сигналах в молоке с антибиотиками и без – максимальные. Также на паре светодиод – фотодиод (рис. 3а) сигнал $U_L = 1029 \pm 4$ мВ для молока без антибиотиков, с антибиотиками сигнал $U_L = (993 - 1000) \pm 5$ мВ. На паре светодиод – фотодиод (рис. 3б) $U_L = 790$ мВ для молока без антибиотика, с антибиотиками $U_L = (594 - 743) \pm 7$ мВ. На паре светодиод – фотодиод (рис. 3с) сигнал люминесценции молока без антибиотиков составляет $U_L = 2097 \pm 8$ мВ, с антибиотиками $U_L = (1713 - 2047) \pm 8$ мВ.

Для расчета оптимального времени и количества измерений люминесценции молока построили графики зависимости абсолютной погрешности от количества измерений пробы молока. Абсолютную погрешность рассчитывали стандартными методами. На рисунке 4 показаны графики зависимости $\Delta(N)$.

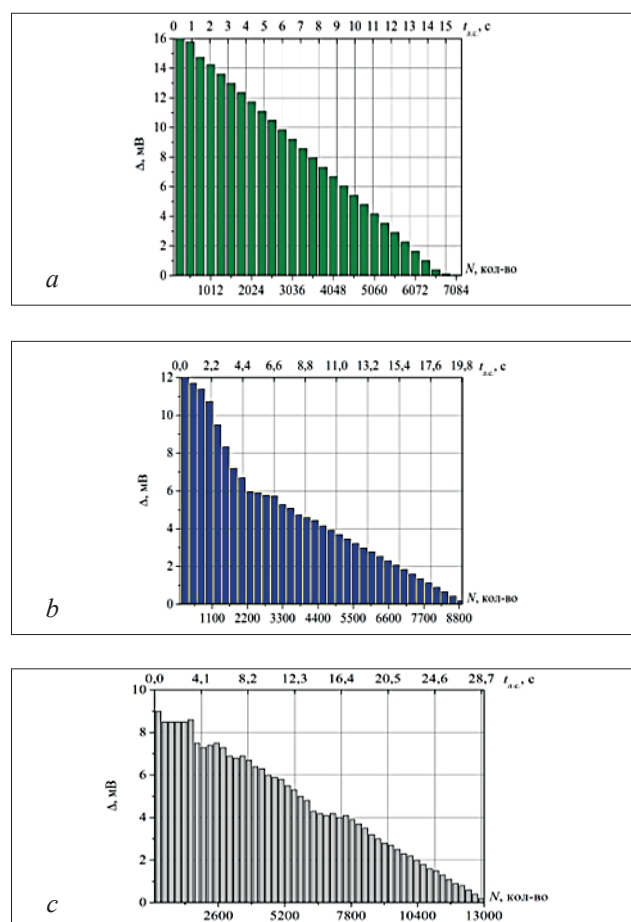


Рис. 4. Графики зависимости $\Delta(N)$: *a* – светодиод 320 нм, фотодиод *BPW21R*, 420-675 нм; *b* – светодиод 362 нм, фотодиод *VEMD 5510CF*, 440-620 нм; *c* – светодиод 362 нм, фотодиод *Hamamatsu s7686*, 480-660 нм

Fig. 4. Dependence of $\Delta(N)$: *a* – 320 nm LED, *BPW21R* photodiode, 420-675 nm; *b* – 362 nm LED, *VEMD 5510CF* photodiode, 440-620 nm; *c* – 362 nm LED, *Hamamatsu s7686* photodiode, 480-660 nm

Из рисунка 4 следует, что при увеличении количества измерений уменьшается абсолютная погрешность. Также одновременно для всех трех пар светодиод – фотодиод количество измерений N больше 13 000 нецелесообразно, так как абсолютная погрешность становится менее 1 мВ, при этом время измерений составляет не более 30 с, что меньше норматива на подготовительные операции к доению. Разное время измерений и достижение минимальной абсолютной погрешности связано не только с разной длиной волны возбуждения и откликом люминесценции молока на нее, но и с диапазонами регистрации, разной чувствительностью фотодиодов, стабильностью работы светодиодов.

Выводы. Определили оптимальный объем наливаемого молока в кювету, который равняется $V = 17,7$ мл с учетом объема молока при сдаивании первых струек 8-26 мл.

По величине фотосигнала выбрали пары светодиод – фотодиод для диагностики антибиотиков в молоке, а именно светодиод 320 нм, фотодиод *BPW21R* 420-675 нм; светодиод 362 нм, фотодиод *VEMD 5510CF* 440-620 нм; светодиод 362 нм, фотодиод *Hamamatsu s7686*, 480-660 нм.

Установили, что для минимальной абсолютной погрешности для всех пар светодиод – фотодиод необходимо количество измерений $N = 7000$ -13 000 при времени измерения лабораторного стенда $t_{л.с} = 15$ -31 с, время сдаивания $t_{сд} = 5$ с, время пробоподготовки $t_{проб} = 5$ с, общее время измерений $t_{общ} = 25$ -41 с, что меньше норматива на подготовительные операции к доению 60 с.

Библиографический список

1. Цой Ю.А., Кирсанов В.В., Мамедова Р.А. и др. Развитие средств механизации и автоматизации в молочном животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 30-37. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-30-37. EDN: UDKOGD.
2. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10. EDN: YFRZDV.
3. Мосолова Н.И., Мосолова Д.А., Сложенкина А.А. и др. Современные проблемы и актуальные подходы в молочном животноводстве // *Аграрно-пищевые инновации*. 2022. N3(19). С. 9-21. DOI: 10.31208/2618-7353-2022-19-9-21. EDN: QSJGIE.
4. Кублин И.М., Найденков В.И., Ивер Н.Н. Пробле-

мы и перспективы молочного животноводства: вектор инновационного развития // *Актуальные проблемы экономики и менеджмента*. 2022. N4(36). С. 61-70. EDN: HRNOZJ.

5. Водяников В.Т., Субаева А.К., Родионова А.Н. Тенденции развития молочного животноводства в условиях цифровизации // *Сельский механизатор*. 2023. N12. С. 30-32. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-12-30-31-32. EDN: WKFFKA.
6. Boldt S., Sinn G., Mittenzwey K.H. et al. Multi-Reflectance-Spectroscopy, Part II: Optical Sensor for In-Line Monitoring of Fat and Protein in Milk-Based Products. *Applied Spectroscopy*. 2025. Vol. 79. Iss. 8. 1242-1255. DOI: 10.1177/00037028251338316. EDN: LPOFWE.
7. Prasanth P., Viswan G., Bennaceur K. Development of a low-cost portable spectrophotometer for milk quality analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. 4863-4868. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.327. EDN: OFGPUD.
8. Ulloa F., Penati M., Monistero V. et al. Enterococcus species identified by MALDI-TOF MS in milk from dairy cow mastitis cases and herd surveys. *Veterinary Research Communications*. 2025. Vol. 49. Iss. 5. 261. DOI: 10.1007/s11259-025-10834-5. EDN: WIIXID.
9. Athira E.T., Dutta S., Singh M.M. et al. Recent progress in optical nanosensors for antibiotics detection. *Applied Nanoscience*. 2023. Vol. 13. Iss. 9. 6519-6538. DOI: 10.1007/s13204-023-02923-1. EDN: VQJQNC.
10. Thu T.V., Cuong N.M., Cao T.C. Trace detection of ciprofloxacin antibiotic using surface-enhanced Raman scattering coupled with silver nanostars. *Optik*. 2022. Vol. 260. 169043. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169043. EDN: FPOUSZ.
11. Самарин Г.Н., Беляков М.В., Ефременков И.Ю. и др. Обнаружение антибиотиков в молоке по его фотолюминесцентным свойствам // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N1(54). С. 10-16. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16. EDN: RIAJBB.

References

1. Tsoy Yu.A., Kirsanov V.V., Mamedova R.A. et al. Evolution of mechanization and automation in dairy farming. *Agricultural machinery and technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 30-37 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-30-37. EDN: UDKOGD.
2. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural machinery and technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-

- 4-6-10. EDN: YFRZDV.
3. Mosolova N.I., Mosolova D.A., Slozhenkina A.A. et al. Modern problems and current approaches in dairy farming. *Agricultural and food innovations*. 2022. N3(19). 9-21 (In Russian). DOI: 10.31208/2618-7353-2022-19-9-21. EDN: QSJGIE.
 4. Kublin I. M., Naidenkov V. I., Iver N. N. Problems and prospects of dairy farming: a vector of innovative development. *Actual problems of economics and management*. 2022. N4(36). 61-70 (In Russian). EDN: HRNOZJ.
 5. Vodyannikov V.T., Subaeva A.K., Rodionova A.N. Trends in the development of dairy farming in the context of digitalization. *Rural machine operator*. 2023. N12. 30-32 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2023-12-30-31-32. EDN: WKFFKA.
 6. Boldt S., Sinn G., Mittenzwey K.H. et al. Multi-Reflectance-Spectroscopy, Part II: Optical Sensor for In-Line Monitoring of Fat and Protein in Milk-Based Products. *Applied Spectroscopy*. 2025. Vol. 79. Iss. 8. 1242-1255. DOI: 10.1177/00037028251338316. EDN: LPOFWE.
 7. Prasanth P., Viswan G., Bennaceur K. Development of a low-cost portable spectrophotometer for milk quality analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. 4863-4868. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.327. EDN: OFGPUD.
 8. Ulloa F., Penati M., Monistero V. et al. Enterococcus species identified by MALDI-TOF MS in milk from dairy cow mastitis cases and herd surveys. *Veterinary Research Communications*. 2025. Vol. 49. Iss. 5. 261. DOI: 10.1007/s11259-025-10834-5. EDN: WIIXID.
 9. Athira E.T., Dutta S., Singh M.M. et al. Recent progress in optical nanosensors for antibiotics detection. *Applied Nanoscience*. 2023. Vol. 13. Iss. 9. 6519-6538. DOI: 10.1007/s13204-023-02923-1. EDN: VQJQNC.
 10. Thu T.V., Cuong N.M., Cao T.C. Trace detection of ciprofloxacin antibiotic using surface-enhanced Raman scattering coupled with silver nanostars. *Optik*. 2022. Vol. 260. 169043. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169043. EDN: FPOUSZ.
 11. Samarin G.N., Belyakov M.V., Efremenkov I.Yu. et al. Detection of antibiotics in milk by its photoluminescent properties. *Electrical Engineering and Equipment in Agriculture*. 2024. Vol. 71. N1(54). 10-16 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16. EDN: RIAJBB.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Самарин Г.Н. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, доработка текста;

Беляков М.В. – научное руководство, обзор литературы, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, обработка результатов исследования, доработка текста, формулирование общих выводов;

Ефременков И.Ю. – проведение измерений и расчетов, обработка результатов исследований, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Samarin G.N. – scientific guidance, formulation of the main research directions, revision of the text;

Belyakov M.V. – scientific guidance, literature review, formulation of the main research directions, development of theoretical prerequisites, processing of research results, revision of the text, formation of general conclusions;

Efremenkov I.Yu. – carrying out measurements and calculations, processing research results, visualization.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 03.04.2026

Статья принята к публикации 17.06.2026



Разработка мини-модуля биоимпедансной диагностики сорных растений для оптимизации параметров электроимпульсной прополки

Артем Сергеевич Угловский¹,

кандидат технических наук, доцент,
e-mail: a.uglovskii@yarcx.ru;

Александр Анатольевич Белов²,

доктор технических наук, главный научный сотрудник,
e-mail: sofronich.bel@mail.ru

¹Ярославский государственный аграрный университет, г. Ярославль, Российская Федерация;

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Реферат. Оптимизация режимов электроимпульсной прополки представляет собой актуальную проблему, поскольку данный метод выступает экологичной альтернативой применению гербицидов, а внедрение систем биоимпедансной диагностики создает возможность находить оптимальные параметры высоковольтного воздействия, минимизируя энергозатраты мобильных сельскохозяйственных платформ. (Цель исследования) Разработать встроенный мини-модуль биоимпедансной диагностики сорных растений и алгоритм адаптивного управления параметрами электрического воздействия на основе электрофизических характеристик растений. (Материалы и методы) В основу аппаратного решения легли специализированный преобразователь импеданса AD5933 и микроконтроллер семейства STM32. Оценка состояния биообъектов проводилась методом спектроскопии в диапазоне 1-100 килогерц. Предложенная архитектура системы управления включает диагностический контур для предварительного сканирования сорных растений и исполнительный высоковольтный блок. Для обеспечения точности в условиях меняющейся среды применен алгоритм периодической калибровки по референсной группе ($n=5$), активируемый через каждые 20 метров пути или при визуально фиксируемом изменении типа почвы. (Результаты и обсуждение) Экспериментальные исследования проводились на образцах сорных растений (осота полевого) при контактном измерении с использованием электродов с золотым покрытием. Установлено, что импеданс растительной ткани уменьшается с 22-23 килоом на частоте 1 килогерц до 4-5 килоом при частоте выше 80 килогерц. На основании спектрального анализа обоснован выбор опорной частоты 50 килогерц, при которой достигается максимальный контраст между типами тканей в диапазоне 20-150 килоом. Разработан алгоритм выборочной калибровки, предусматривающий измерение биоимпеданса ограниченного числа растений с последующим расчётом оптимального напряжения и длительности импульса воздействия. (Выводы) Результаты моделирования показали, что применение разработанного мини-модуля и адаптивного алгоритма управления позволяет снизить энергопотребление высоковольтной подсистемы на 35-40 процентов при сохранении требуемой эффективности уничтожения сорной растительности. Полученные результаты подтверждают перспективность использования биоимпедансной диагностики в системах точного земледелия и автономной агробототехники.

Ключевые слова: электроимпульсная прополка, биоимпеданс, агробот, STM32, AD5933, энергоэффективность, адаптивное управление.

Для цитирования: Угловский А.С., Белов А.А. Разработка мини-модуля биоимпедансной диагностики сорных растений для оптимизации параметров электроимпульсной прополки // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №2. С. 24-32. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-24-32. EDN: EPHTNQ.

Development of a Mini-Module for Bioimpedance Weed Diagnostics to Optimize Parameters of Electric Pulse Weeding

Artem S. Uglovskiy¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor, e-mail: a.uglovskii@yarcx.ru;

Aleksandr A. Belov²,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, e-mail: sofronich.bel@mail.ru

¹Yaroslavl State Agricultural University, Yaroslavl, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Optimization of electric pulse weeding modes is an urgent problem, since this method acts as an environmentally friendly alternative to the use of herbicides, and the introduction of bioimpedance diagnostics systems makes it possible to find the optimal parameters of high-voltage exposure, minimizing the energy consumption of mobile agricultural platforms. (Research Purpose) The research purpose is developing a built-in mini-module for bioimpedance diagnostics of weeds and an algorithm for adaptive control of electrical exposure parameters based on the electrophysical characteristics of plants. (Materials and methods) The hardware solution is based on a specialized impedance converter AD5933 and a microcontroller of the STM32 family. The assessment of the state of biological objects was carried out by spectroscopy in the range of 1-100 kilohertz. The proposed control system architecture includes a diagnostic circuit for preliminary scanning of weeds and an executive high-voltage unit. To ensure accuracy in a changing environment, an algorithm of periodic calibration according to the reference group ($n=5$) was applied, activated every 20 meters of the path or with a visually recorded change in soil type. (Results and discussion) Experimental studies were carried out on samples of weeds (scar weed) during contact measurement using gold-coated electrodes. It was found that the impedance of plant tissue decreases from 22-23 kilohms at a frequency of 1 kilohertz to 4-5 kilohms at a frequency above 80 kilohertz. Based on the spectral analysis, the choice of a reference frequency of 50 kilohertz is justified, at which the maximum contrast between tissue types in the range of 20-150 kilohms is achieved. A selective calibration algorithm has been developed that provides for the measurement of the bioimpedance of a limited number of plants, followed by the calculation of the optimal voltage and duration of the exposure pulse. (Conclusions) The simulation results showed that the use of the developed mini-module and adaptive control algorithm reduces the energy consumption of the high-voltage subsystem by 35-40 percent while maintaining the required efficiency of weed destruction. The results obtained confirm the prospects of using bioimpedance diagnostics in precision farming systems and autonomous agro-robotics.

Keywords: electric pulse weeding, bioimpedance, agricultural robot, STM32, AD5933, energy efficiency, adaptive control.

For citation: Uglovskiy A.S., Belov A.A. Development of a mini-module for bioimpedance weed diagnostics to optimize parameters of electric pulse weeding. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 24-32 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-24-32. EDN: EPHTNQ.

Для борьбы с сорными растениями в условиях ограничения или отказа от применения химических гербицидов применяют альтернативные методы – такие как лазерное, плазменное или электроимпульсное воздействие [1]. Электроимпульсный метод основан на воздействии электрического поля высокого напряжения, при котором через ткани растения протекает ток, вызыва-

ющий локальный нагрев, разрушение клеточных мембран и последующую гибель растения [2, 3].

В рамках цифрового преобразования сельского хозяйства более предпочтительными в эффективности и производительности кажутся роботизированные пропольщики [4]. Современные роботизированные системы электроимпульсной прополки, как правило, используют фиксированные параметры электри-

ческого воздействия, отобранные на обеспечение максимальной устойчивости сорных растений [5]. Данный подход гарантирует высокую вероятность их уничтожения, однако сопровождается значительными энергетическими затратами и снижением автономности мобильных платформ [6]. При этом не учитываются различия между видами сорных растений, их фазы вегетации, степень одревеснения и водонасыщенность тканей [7].

Анализ существующих решений показывает, что повышение энергоэффективности электроимпульсной прополки возможно за счёт введения обратной связи о свойствах объекта воздействия [8]. Одним из перспективных диагностических параметров является электрический импеданс растительной ткани, отражающий её электрофизическое и морфологическое состояния [9].

Цель исследования – разработать встроенный мини-модуль биоимпедансной диагностики сорных растений и алгоритм адаптивного управления параметрами электроимпульсного воздействия для снижения энергопотребления роботизированной системы.

Материалы и методы. Растительная ткань рассматривается как неоднородная электрофизическая среда [10], обладающая как активными, так и реактивными свойствами [11]. Комплексный электрический импеданс может быть представлен в виде [12]:

$$Z(\omega) = R + jX, \quad (1)$$

где R – активная составляющая, определяемая концентрацией электролитов и содержанием воды в клеточном соке; X – реактивная составляющая, связанная с ёмкостными свойствами клеточных мембран и структурой ткани.

Молодые растения с высокой водонасыщенностью характеризуются низкими значениями импеданса, в то время как зрелые или одревесневшие растения обладают более высоким комплексным сопротивлением [13]. Данное различие напрямую связано с энергией, необходимой для формирования необратимых повреждений при электрическом воздействии [14].

Разработанный измерительный мини-модуль выполнен в виде компактного блока, устанавливаемого на манипулятор мобильного агробота. Конструкция системы базируется на пространственном разнесении диагностического и исполнительного узлов. Измерительный мини-модуль (диагностический контур) выполняет предварительный захват и экспресс-анализ биоимпеданса сорного растения, после чего данные передаются в систему управления для корректировки параметров высоковольтного

блока (исполнительного контура), расположенного за пределами измерительной зоны. Такое решение исключает влияние высоковольтных наводок на прецизионные цепи преобразователя *AD5933* и позволяет реализовать алгоритм упреждающего управления. Мини-модуль включает:

- корпус с экранирующими перегородками;
- параллельный захват растения с сервоприводом;
- два измерительных электрода полуцилиндрической формы, контактирующих с растительной тканью.

Контактные поверхности электродов выполнены с золотым покрытием, что обеспечивает стабильность электрического контакта и снижает влияние коррозии и загрязнений.

Электронная архитектура включает:

- микроконтроллер *STM32F103*, выполняющий функции управления захватом, обработки измерений и обмена данными с основным вычислительным блоком робота;
- преобразователь импеданса *AD5933*, формирующий зондирующий сигнал в диапазоне частот 1-100 кГц и выполняющий цифровую обработку отклика;
- силовой драйвер управления сервоприводом захвата.

Связь между *STM32* и *AD5933* реализована по интерфейсу I^2C . Компоновка плат выполнена по мезонинной схеме, что позволяет минимизировать длину сигнальных соединений и снизить влияние паразитных параметров.

В среде *FreeCAD* разработана параметрическая 3D-модель измерительного мини-модуля, включающая корпус, электронные платы, привод и измерительные электроды. Размещение мини-модуля *AD5933* непосредственно над входами АЦП микроконтроллера позволило сократить длину сигнальных линий до 20 мм. При моделировании учтены длины гибких проводников от подвижных элементов захвата, сопротивление которых компенсируется в процессе калибровки.

Для подтверждения предложенных технических решений и проведения предварительных тестов на основе описанной архитектуры был изготовлен встроенный мини-модуль (рис. 1).

Мини-модуль разработан для проведения автоматизированного спектрального анализа импеданса биологических и химических объектов. Устройство совмещает функции прецизионного измерителя и системы механического позиционирования, что позволяет проводить серийные лабораторные исследования в автоматическом режиме с высокой повторяемостью результатов.

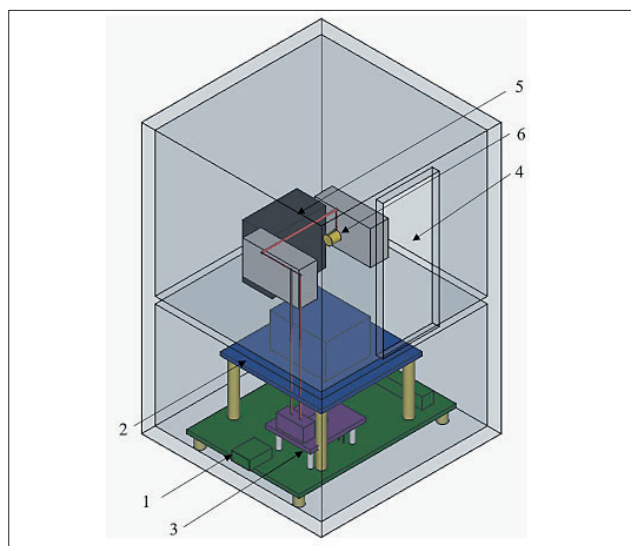


Рис. 1. Компоненка элементов встроенного мини-модуля диагностики сорных растений: 1 – плата STM32; 2 – плата драйвера двигателя; 3 – преобразователь AD5933; 4 – технологическое окно; 5 – сервопривод; 6 – измерительные электроды

Fig. 1. Layout of the integrated mini-weed diagnostic module components: 1 – STM32 board; 2 – motor driver board; 3 – AD5933 converter; 4 – process window; 5 – servo drive; 6 – measuring electrodes

Разработанная схема представляет собой автоматизированную систему импедансометрии (рис. 2). Микроконтроллер STM32F103 управляет позиционированием датчика с помощью драйвера TB6612FNG и считывает показания биоимпеданса с прецизионного анализатора AD5933. Особое внимание в схеме уделено разделению питания (фильтрующих конденсаторов C1, C2) и согласованию уровней, что обеспечивает стабильную работу цифровой и аналоговой частей.

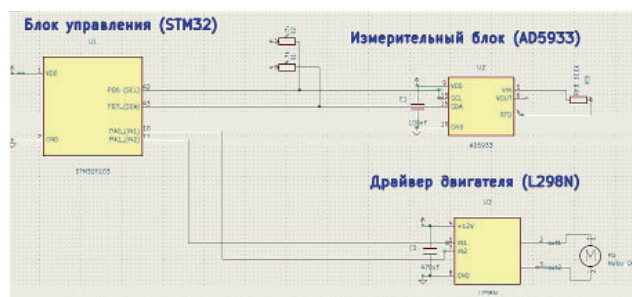


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема встроенного мини-модуля биоимпедансной диагностики сорных растений

Fig.2. Schematic diagram of the integrated mini-module for bioimpedance diagnostics of weeds

Чтобы исключить необходимость индивидуального измерения растений разработан алгоритм выбороч-

ной калибровки, включающий следующие этапы:

1. Анализ агрофона и выявление зоны однородной растительности.
2. Захват и измерение биоимпеданса ограниченного числа образцов ($n = 5$).
3. Вычисление среднего значения модуля импеданса $|Z|_{ср}$.
4. Расчёт оптимального напряжения электрического воздействия:

$$U_{opt} = K_s \cdot I_{повр} \cdot |Z|_{ср}, \quad (2)$$

где K_s – коэффициент запаса; $I_{повр}$ – ток, обеспечивающий необратимое повреждение тканей; $|Z|_{ср}$ – среднее значение модуля импеданса.

Функционирование разработанной системы управления электроимпульсной прополкой основано на гибридной алгоритмической стратегии, предусматривающей чередование фаз высокоточной калибровки и потоковой обработки сорной растительности. Такой подход позволяет учитывать пространственную неоднородность агрофона без существенного снижения производительности мобильного агрегата.

Логическая структура алгоритма управления представлена на рисунке 3 в виде блок-схемы, отражающей последовательность состояний и условий перехода между ними.

В начале каждого цикла управления выполняется анализ необходимости актуализации параметров высоковольтного генератора. Решение о переходе системы в режим калибровки принимается на основе оценки совокупности эксплуатационных и визуальных признаков. Условие активации режима калибровки $C_{калиб}$ формализуется следующим образом:

$$C_{калиб} = (D_{пути} > D_{пред}) \vee (\Delta V_{почв} > V_{пор}), \quad (3)$$

где $D_{пути}$ – длина пути, пройденного агрегатом с момента последней калибровки; $D_{пред}$ – предельное значение дистанции, после превышения которого требуется повторная настройка параметров (в работе принято $D_{пред} = 20$ м); $\Delta V_{почв}$ – изменение визуального паттерна почвы и растительности, определяемое системой технического зрения; $V_{пор}$ – порог чувствительности визуального анализа.

Использование указанного условия позволяет учитывать как пространственные изменения растительного покрова, так и накопленные погрешности, связанные с длительной работой системы без повторной настройки.

Алгоритм функционирует в двух режимах – основном (динамическом) и калибровочном. Для минимизации простоев и сохранения высокой средней

скорости движения шасси используется стратегия выборочной калибровки. Система выполняет полную остановку манипулятора и замер биоимпеданса не для каждого объекта, а лишь при обнаружении существенного изменения характеристик фитоценоза или по достижении предельной дистанции $D_{\text{пред}}$. Это позволяет агроботу сохранять темп обработки, обновляя параметры воздействия при необходимости актуализации данных статистической модели среды. Таким образом, кратковременные остановки (1-2 с) на 5-10% площади участка позволяют оптимизировать энергопотребление на оставшихся 90-95% площади, не оказывая негативного влияния на общую производительность системы.

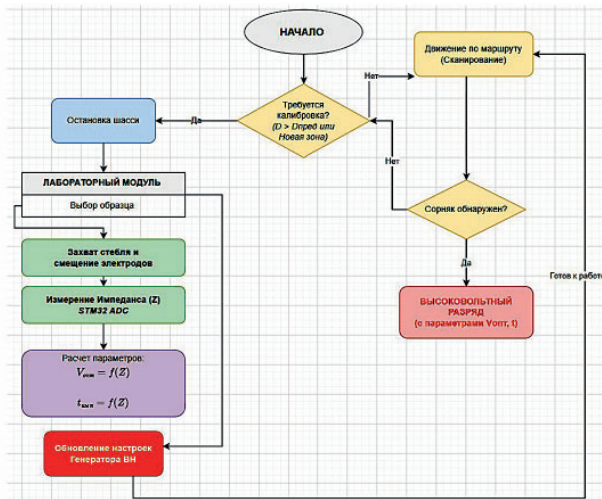


Рис. 3. Блок-схема алгоритма адаптивно-калибровочного управления

Fig.3. Block diagram of the adaptive calibration control algorithm

На этапе выборки манипулятор последовательно захватывает референсную группу сорных растений численностью $n = 3-5$, расположенных в зоне досягаемости [15]. Для каждого захваченного образца измерительный мини-модуль, реализованный на базе микросхемы *AD5933*, выполняет частотное сканирование и регистрирует модуль комплексного электрического сопротивления растительной ткани $|Z|$.

Полученные значения импеданса обрабатываются путём вычисления среднего значения

$$|Z|_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i|, \quad (4)$$

на основе которого производится расчёт оптимальных параметров электроимпульсного воздействия, включая напряжение разряда $U_{\text{опт}}$ и длительность импульса $t_{\text{имп}}$. [16]. Рассчитанные параметры передаются в регистры управления высоковольтного

генератора, после чего система переходит в состояние готовности к возобновлению движения и потоковой обработки.

Применение выборочной калибровки позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на диагностические операции, и снизить энергетические потери, связанные с частыми остановками агрегата, при сохранении адаптивности управления.

Результаты и обсуждение. На рисунке 4 представлена модельная зависимость модуля комплексного электрического сопротивления растительной ткани от частоты возбуждающего тока для двух характерных типов растительных объектов: молодого побега с высокой влажностью и одревесневшего стебля с пониженным содержанием влаги. Анализ спектров показывает, что с увеличением частоты возбуждения наблюдается монотонное снижение модуля импеданса, обусловленное уменьшением реактивного сопротивления клеточных мембран.

При этом в диапазоне частот порядка 40-60 кГц различия между типами тканей достигают максимальных значений. В указанной области обеспечивается наибольший контраст между сочными и одревесневшими растениями по модулю импеданса, что позволяет использовать данный частотный диапазон в качестве диагностического для задач классификации и адаптивной настройки параметров электроимпульсного воздействия. На основании модельного анализа в качестве опорной частоты выбрано значение 50 кГц, обеспечивающее устойчивое разделение классов при допустимом уровне шума.

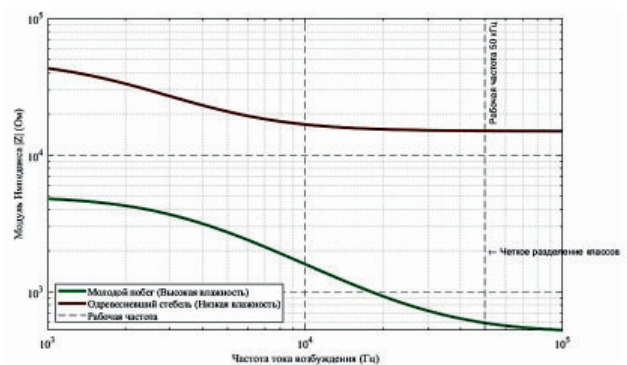


Рис. 4. Спектр биоимпеданса растительной ткани
Fig. 4. Bioimpedance spectrum of plant tissue

На рисунке 5 приведены результаты экспериментального сканирования электрического импеданса стебля осота полевого, выполненного с использованием разработанного измерительного мини-модуля на базе ИМС *AD5933*. Измерения проводились в диапазоне частот от 1 до 100 кГц. Дискретные

точки на графике соответствуют значениям, зарегистрированным встроенным аналого-цифровым преобразователем AD5933, а сплошная линия представляет собой аппроксимацию экспериментальных данных модифицированной моделью Коул-Коула, применяемой для описания электрических свойств биологических тканей.

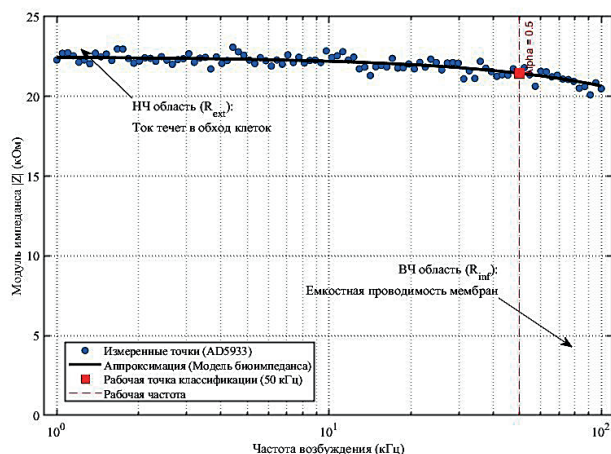


Рис. 5. Результат сканирования импеданса мини-модулем AD5933

Fig. 5. Result of impedance scanning with AD5933 mini-module

Экспериментальная кривая характеризуется выраженным снижением модуля импеданса с ростом частоты: от значений 22-23 кОм на частоте 1 кГц до 4-5 кОм на частотах выше 80-100 кГц. Наблюдаемое действие соответствует эффекту β -дисперсии, обусловленному ёмкостной проводимостью клеточных мембран. На низких частотах электрический ток протекает преимущественно по внеклеточной жидкости, обладающей повышенным сопротивлением. С ростом частоты реактивное сопротивление мембран уменьшается, что обеспечивает проникновение тока во внутриклеточное пространство и приводит к снижению общего импеданса ткани.

Рабочая частота 50 кГц, выделенная на графике, расположена в области перехода между внеклеточной и внутриклеточной проводимостью и характеризуется высокой чувствительностью к структурным

различиям растительной ткани. Это подтверждает обоснованность выбора данной частоты в качестве опорной для алгоритма классификации и адаптивной калибровки параметров электроимпульсного воздействия.

Для обеспечения возможности контактного измерения биоимпеданса в составе компактного защищённого корпуса в конструкции мини-модуля предусмотрено технологическое окно (слот) доступа к стеблю растения. Данное окно расположено в верхней части корпуса – в зоне размещения механизма захвата и измерительных электродов.

Функциональное назначение технологического окна заключается в следующем:

1. Ввод стебля в рабочую зону. При подводе манипулятора к сорному растению стебель попадает в окно и направляется в область контакта с губками захвата и электродами.
2. Обеспечение свободного хода механизма захвата. Геометрия окна обеспечивает необходимое пространство для размыкания и смыкания губок без контакта с корпусом.

3. Защита электронной части. Нижняя часть корпуса, в которой размещены платы управления (STM32) и измерительного мини-модуля (AD5933), выполнена герметичной, что предотвращает попадание влаги, растительных остатков и загрязнений на электронные компоненты.

Такое конструктивное решение обеспечивает надёжность измерений в полевых условиях при сохранении компактности и механической защищённости устройства.

Для корректной работы преобразователя импеданса AD5933 в измерительной схеме используется резистор обратной связи R_{FB} , включённый между выводами V_{IN} и V_{OUT} . Номинал R_{FB} выбирается исходя из ожидаемого диапазона измеряемых сопротивлений растительной ткани с целью предотвращения насыщения входного каскада и обеспечения максимального отношения сигнал/шум.

В таблице 1 приведены рекомендуемые значения R_{FB} в зависимости от диапазона измеряемого импеданса.

Рекомендуемые значения резистора обратной связи AD5933 Recommended AD5933 Feedback Resistor Values		
Диапазон измеряемого импеданса	Рекомендуемый R_{FB}	Примечание
1–10 кОм	5 кОм	Низкие сопротивления
10–100 кОм	50 кОм	Средний диапазон
100 кОм – 1 МОм	500 кОм	Высокие сопротивления
> 1 МОм	1 МОм	Требует точной калибровки

Table 2		Таблица 2
Оценочные параметры биоимпедансной модели осота полевого Estimated parameters of the bioimpedance model of scar weed		
Параметр	Ожидаемое значение	Комментарий
Сопротивление R_{plant}	20-150 кОм	Зависит от расстояния между электродами (1-2 см)
Ёмкость C_{plant}	100 пФ-2 нФ	Определяет фазовый сдвиг
Оптимальный R_{FB}	100 кОм	Сопоставим с импедансом растения
Диапазон частот	1-100 кГц	Переход от внеклеточной к внутриклеточной проводимости
Напряжение возбуждения	2,0 В	Максимизация отношения сигнал/шум

На основании экспериментальных данных и литературных источников сформирован оценочный профиль биоимпедансных параметров осота полевого, используемый для выбора элементов измерительной схемы и настройки режима работы *AD5933* (табл. 2).

В области частот ниже 5 кГц наблюдается существенный рост погрешности измерения, обусловленный аппаратными ограничениями архитектуры преобразователя *AD5933* (эффект спектрального наложения и ограничения цифрового фильтра *DFT*).

Результаты настоящей работы согласуются с опубликованными исследованиями отечественных авторов, посвящёнными электроимпульсному воздействию на сорную растительность и анализу электрофизических свойств растительных тканей. В частности, в работах Юдаева И.В. показано, что эффективность электрического уничтожения сорных растений в значительной степени определяется водонасыщенностью тканей, анатомическим строением стебля и фазой вегетации [2]. Отмечается, что использование фиксированных энергетических параметров разряда не учитывает указанные факторы и приводит либо к неполному поражению устойчивых растений, либо к избыточному энергопотреблению при обработке молодых всходов.

В исследованиях Брениной Т.А. установлено, что электропроводность и электрическое сопротивление растительных тканей могут рассматриваться как информативные показатели физиологического состояния растений и их устойчивости к физическим методам воздействия (Бренина Т.П. Расширение технологических возможностей и повышение эффективности электроимпульсного уничтожения корнеотпрысковых сорняков: диссертация канд. техн. наук: 05.20.02. Саратов: Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова. 2006. 231 с.). При этом подчёркивается, что измерение сопротивления постоянным током сопровождается поляризацией электродов и нестабильностью контакта, что ограничивает применение данного подхода в полевых условиях.

В отличие от подходов, представленных в работах Юдаева И.В. и Брениной Т.А., ориентированных

преимущественно на анализ процесса электроимпульсного воздействия, в настоящей работе биоимпедансные характеристики используются непосредственно в контуре управления для адаптации параметров высоковольтного разряда. Такой подход позволяет перейти от усреднённых энергетических режимов к локальной настройке воздействия в зависимости от состояния сорной растительности, что обеспечивает снижение энергопотребления без снижения эффективности уничтожения растений.

Выводы. Проведенные исследования и апробация разработанного измерительного модуля на базе преобразователя *AD5933* и микроконтроллера *STM32* показали, что использование биоимпедансной спектроскопии в контуре управления агроботом позволяет реализовать адаптивный выбор параметров высоковольтной прополки. Разработанный модуль и алгоритм управления могут применяться в составе автономных мобильных платформ для точного земледелия; навесных агрегатов для междурядной обработки пропашных культур; автоматизированных систем мониторинга физиологического состояния растений в закрытом грунте; лабораторных стендов для исследования электрофизических свойств биологических объектов.

Оценка энергозатрат показала, что при использовании традиционных систем электроимпульсной прополки с фиксированными параметрами напряжения расход энергии для обработки одного растения является избыточным. Экспериментально установлено, что в диапазоне частот до 80 кГц модуль комплексного сопротивления тканей осота полевого снижается с 22-23 до 4-5 кОм. Внедрение предложенной системы адаптивной коррекции напряжения на основе данных о текущем импедансе позволило снизить общее энергопотребление высоковольтного исполнительного блока на 35-40%, которое достигается за счет исключения режимов работы на максимальных амплитудах при контакте с растениями, имеющими низкое внутреннее сопротивление.

Несмотря на необходимость защиты измерительных цепей от высоковольтных помех, данная

технология обладает значительным потенциалом для повышения автономности робототехнических комплексов. Дальнейшая оптимизация алгоритмов фильтрации сигнала, а также расширение базы калибровочных данных для различных видов сорной растительности позволят существенно повысить конкурентоспособность систем электроимпульсной прополки и расширить область их внедрения в промышленное производство в ближайшей перспективе.

Библиографический список

1. Марченко Л.А., Кутырёв А.И. Параметры и режимы работы мобильных устройств для лазерной прополки растений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. N3(60). С. 3-16. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-3-16. EDN: DTYCHR.
2. Yudaev I.V., Daus Y.V., Sharov I.V. Electropulse Weed Control as an Element of Organic Farming in Sustainable Agriculture. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2025. Vol. 61. 925. DOI: 10.3103/S1068375525701005. EDN: GCFGAV.
3. Borger C.P.D., Slaven M.J. Electric weed control – how does it compare to conventional weed control methods? *Weed Science*. 2025. Vol. 73. 1-12. DOI: 10.1017/wsc.2024.45.
4. Марченко Л.А., Кутырёв А.И. Техничко-технологические аспекты лазерной прополки растений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N3(56). С. 3-11. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-3-3-11. EDN: MDIRDM.
5. Bloomer D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H. et al. Micro Electric Shocks Control Broadleaved and Grass Weeds. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. 9. 2039. DOI: 10.3390/agronomy12092039.
6. Feys J., De Cauwer B., Reheul D. et al. Impact of Electrocution on Shoot and Tuber Vitality of Yellow Nutsedge (*Cyperus esculentus*). *Agriculture*. 2023. Vol. 13. 695. DOI: 10.3390/agriculture13030695.
7. Vaccin L.C., Moretti M.L. Electrical weed control in organic highbush blueberry: influence of operational speed and number of applications on weed control. *Frontiers in Agronomy*. 2025. Vol. 7. 1688961. DOI: 10.3389/fagro.2025.1688961.
8. Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А. и др. Диагностика на фабриках растений: обзор неинвазивных методов мониторинга состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N6. С. 70-75. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-70-75. EDN: IAKFDG.
9. Ibba P., Falco A., Benammar A. et al. Design and Validation of a Portable AD5933-Based Impedance Analyzer for Smart Agriculture. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. 74269-74279. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074269.
10. Маликов В.Н., Шмыкова П.А., Фадеев Д.А. и др. Изучение дисперсии импеданса биологических тканей // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. N8. С. 245-249. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-245-246. EDN: OKHCUX.
11. Dokholyan Zh.G., Melkonyan A.A., Grigoryan Y.K. Electrical impedance and equivalent biological tissue circuit (analysis and modeling). Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. *Information Technologies, Electronics, Radio Engineering*. 2020. Iss. 1. 77-85. EDN: WNKPLL.
12. Melkonyan A. Analysis and modeling of equivalent schemes of biological tissue. *East European Scientific Journal*. 2019. Iss. 4-1(44). 41-48. EDN: ATZGTB.
13. Pliquet U., Barthel A. Interfacing the AD5933 for bio-impedance measurements with front ends providing galvanostatic or potentiostatic excitation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. Vol. 407. 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/407/1/012019.
14. McAdams E., Jossinet J. Problems in equivalent circuit modelling of the electrical properties of biological tissues. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*. 1996. Vol. 40. 147-152. DOI: 10.1016/0302-4598(96)05069-6.
15. Угловский А.С. Экспериментальное исследование и моделирование изменения импеданса биологических объектов на примере сорных растений при воздействии высоковольтных импульсов // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2025. N4(72). С. 160-166. DOI: 10.35694/YARCX.2025.72.4.023. EDN: VTJONU.
16. Угловский А.С., Белов А.А. Моделирование процесса уничтожения сорных растений высоковольтным разрядом в программе COMSOL Multiphysics 6.3 (модуль «Plasma») // *Техника и оборудование для села*. 2026. N2(344). 35-39. DOI: 10.33267/2072-9642-2026-2-35-39. EDN: AJUAAO.

References

1. Marchenko L. A., Kutyrev A. I. Parameters and operating modes of mobile devices for laser weeding of plants // *Electrical technologies and equipment in the agro-industrial complex*. 2025. Vol. 72. N3(60). 3-16 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-3-16. EDN: DTYCHR.
2. Yudaev I. V., Daus Y. V., Sharov I. V. Electropulse Weed Control as an Element of Organic Farming in Sustainable Agriculture. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2025. Vol. 61. 925. DOI: 10.3103/

- S1068375525701005. EDN: GCFGAV.
3. Borger C. P. D., Slaven M. J. Electric weed control—how does it compare to conventional weed control methods? *Weed Science*. 2025. Vol. 73. 1-12. DOI: 10.1017/wsc.2024.45.
 4. Marchenko L. A., Kutyrev A. I. Technical and technological aspects of laser weeding of plants. *Electrical technologies and equipment in the agro-industrial complex*. 2024. Vol. 71. N3(56). 3-11. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-3-3-11 (In Russian). EDN: MDIRDM.
 5. Bloomer D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H. et al. Micro Electric Shocks Control Broadleaved and Grass Weeds. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. Iss. 9. 2039. DOI: 10.3390/agronomy12092039.
 6. Feys J., De Cauwer B., Reheul D. et al. Impact of Electrocutation on Shoot and Tuber Vitality of Yellow Nutsedge (*Cyperus esculentus*). *Agriculture*. 2023. Vol. 13. 695. DOI: 10.3390/agriculture13030695.
 7. Baccin L.C., Moretti M.L. Electrical weed control in organic highbush blueberry: influence of operational speed and number of applications on weed control. *Frontiers in Agronomy*. 2025. Vol. 7. 1688961. DOI: 10.3389/fagro.2025.1688961.
 8. Burynin D.A., Smirnov A.A., Proshkin Yu.A. et al. Screening in plant factories: A review of non-invasive plant monitoring techniques for closed regulated agroecosystems. *Agroengineering*. 2022. Vol. 24. Iss. 6. 70-75 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-70-75. EDN: IAKFDG.
 9. Ibba P., Falco A., Benammar A. et al. Design and Validation of a Portable AD5933-Based Impedance Analyzer for Smart Agriculture. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. 74269-74279. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074269.
 10. Malikov V.N., Shmykova P.A., Fadeev D.A. et al. Studying the dispersion of impedance biological tissue. Proceedings of Tula State University. *Technical Sciences*. 2023. Iss. 8. 245-249 (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-245-246. EDN: OKHCUX.
 11. Dokholyan Zh.G., Melkonyan A.A., Grigoryan Y.K. Electrical impedance and equivalent biological tissue circuit (analysis and modeling). Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Information Technologies, *Electronics, Radio Engineering*. 2020. Iss. 1. 77-85. EDN: WNKPLL.
 12. Melkonyan A. Analysis and modeling of equivalent schemes of biological tissue. *East European Scientific Journal*. 2019. Iss. 4-1(44). 41-48. EDN: ATZGTB.
 13. Pliquet U., Barthel A. Interfacing the AD5933 for bioimpedance measurements with front ends providing galvanostatic or potentiostatic excitation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. Vol. 407. 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/407/1/012019.
 14. McAdams E., Jossinet J. Problems in equivalent circuit modeling of the electrical properties of biological tissues. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*. 1996. Vol. 40. 147-152. DOI: 10.1016/0302-4598(96)05069-6.
 15. Uglovskiy A.S. Experimental study and modeling of changes in the impedance of biological objects on the example of weeds when exposed to high-voltage pulses. *Bulletin of the Agro-industrial complex of the Upper Volga region*. 2025. N4(72). 160-166 (In Russian). DOI: 10.35694/YARCX.2025.72.4.023. EDN: VTJOHU.
 16. Uglovskiy A.S. Simulation of the process of weed destruction by a high-voltage discharge in the COMSOL Multiphysics 6.3 (Plasma module). *Machinery and equipment for the village*. 2026. N2(344). 35-39 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2026-2-35-39. EDN: AJUAAO.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All the authors have made an equivalent contribution to the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 03.04.2026

Статья принята к публикации 24.06.2026



Разработка и применение нейросетевой модели для прогнозирования аварийности в сельских распределительных сетях 0,4 кВ

Шамсудин Зелимович Зиниев¹,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: injenerni-klub@mail.ru;

Виталий Александрович Каргин^{2,3},

доктор технических наук, доцент;

Игорь Владимирович Кротов²,

аспирант;

Рустам Абу-Муслимович Магомадов¹,

кандидат технических наук, доцент

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Чеченская Республика, г. Грозный, Российская Федерация;

²Российский биотехнологический университет, Москва, Российская Федерация;

³Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация

Реферат. Воздушные линии электропередачи 0,4 киловольт важны для электроснабжения сельских территорий, однако подвержены частым повреждениям из-за климатических воздействий, износа и внешних факторов. В Шалинском районе Чеченской Республики сложные климатические условия усиливают проблему аварийности. Традиционные методы диагностики не обеспечивают достаточной точности прогнозирования, что обуславливает необходимость применения современных подходов машинного обучения, в частности нейронных сетей, для перехода к проактивному обслуживанию и повышению надежности. (Цель исследования) Разработать регрессионную модель на основе нейронной сети, предназначенную для прогнозирования количества и типа повреждений, возникающих на воздушных линиях 0,4 киловольт в условиях Шалинского района. (Материалы и методы) Применили для обучения и валидации модели структурированные данные о повреждениях воздушных линий 0,4 киловольт за 2018-2023 годы из журналов районных электрических сетей. Разработали полносвязную нейронную сеть с двумя скрытыми слоями, использующими функцию активации ReLU, и выходным слоем из семи нейронов для регрессии. Провели обучение с помощью оптимизатора RMSProp, метрики средней абсолютной ошибки (MAE) и техники ранней остановки для предотвращения переобучения. (Результаты и обсуждение) Показали, что в ходе экспериментов с различными архитектурами нейронных сетей наилучшие результаты достигнуты для модели с двумя скрытыми слоями, содержащими 16 и 64 нейрона соответственно. Установили, что эта конфигурация продемонстрировала среднюю абсолютную ошибку MAE на уровне 0,20, что служит приемлемым показателем для данной задачи. Отметили, что увеличение сложности архитектуры не всегда приводило к улучшению прогностической способности, подтверждая необходимость оптимизации структуры. Выявили, что наиболее значимые факторы, влияющие на аварийность воздушных линий 0,4 киловольт, – срок эксплуатации линии и метеорологические условия. (Выводы) Констатировали, что разработанная нейросетевая модель способна прогнозировать количество и тип повреждений воздушных линий 0,4 киловольт с приемлемой точностью; идентификация ключевых факторов аварийности позволяет целенаправленно планировать мероприятия по повышению надежности.

Ключевые слова: нейронные сети, регрессионная модель, линии 0,4 кВ, прогнозирование повреждений, машинное обучение, электрические сети, надежность электроснабжения, прогнозирование аварийности.

Для цитирования: Зиниев Ш.З., Каргин В.А., Кротов И.В., Магомадов Р.А.-М. Разработка и применение нейросетевой модели для прогнозирования аварийности в сельских распределительных сетях 0,4 кВ // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №2. С. 33-39. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-33-39. EDN: DWEIKY.

Development and Application of a Neural Network Model for Predicting Failure Rate in Rural Distribution Grids of 0.4 kV

Shamsudin Z. Ziniev¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor, e-mail: injenerni-klub@mail.ru;

Vitaliy A. Kargin^{2,3},

Dr.Sc.(Eng.), associate professor;

Igor V. Krotov²,

postgraduate;

Rustam A-M. Magomadov¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor

¹Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, Chechen Republic, Grozny, Russian Federation;

²Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation;

³Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

Abstract. Overhead power lines of 0.4 kilovolt are important for power supply in rural areas, but are subject to frequent damage due to climatic influences, wear and external factors. In the Shalinsky district of the Chechen Republic, difficult climatic conditions exacerbate the problem of accidents. Traditional diagnostic methods do not provide sufficient prediction accuracy, which necessitates the use of modern machine learning approaches, in particular neural networks, transition to proactive maintenance and improving reliability. (Research purpose) The research purpose is developing a regression model based on a neural network designed to predict the number and type of damage occurring on 0.4 kilovolt overhead lines in the Shalinsky district. (Materials and methods) For training and validation of the model, structured data on damage of 0.4 kilovolt overhead lines for 2018-2023 were applied from the journals of regional electric grids. We have developed a fully connected neural network with two hidden layers using the ReLU activation function and an output layer of seven neurons for regression. We conducted training using the RMSProp optimizer, the average absolute error metric (MAE) and the early stop technique to prevent overfitting. (Results and discussion) It was shown that during experiments with various neural network architectures, the best results were achieved for a model with two hidden layers containing 16 and 64 neurons, respectively. It was found that this configuration demonstrated an average absolute MAE error of 0.20, which is an acceptable indicator for this task. It was noted that an increase in the complexity of the architecture did not always lead to an improvement in predictive ability, confirming the need to optimize the structure. It was found that the most significant factors affecting the accident rate of 0.4 kilovolt overhead lines are the service life of the line and meteorological conditions. (Conclusions) It was stated that the developed neural network model is able to predict the number and type of damage of 0.4 kilovolt overhead lines with acceptable accuracy; identification of key accident factors makes it possible to purposefully plan measures to improve reliability.

Keywords: neural networks, regression model, lines of 0.4 kV, fault prediction, machine learning, electrical grids, power supply reliability, accident rate prediction.

For citation: Ziniev Sh.Z., Kargin V.A., Krotov I.V., Magomadov R.A-M. Development and application of a neural network model for predicting failure rate in rural distribution grids of 0.4 kV. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 33-39 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-33-39. EDN: DWEIKY.

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) 0,4 кВ играют ключевую роль в обеспечении электроэнергией потребителей в сельской местности и малых населенных пунктах, формируя основу распределительных сетей [1, 2]. Бесп-

ребойное функционирование данных линий критически важно для поддержания жизнедеятельности населения и работы объектов агропромышленного комплекса [3, 4]. Вместе с тем ВЛ 0,4 кВ подвержены различным видам повреждений, обуслов-

ленных воздействием атмосферных явлений, естественным износом оборудования, а также внешними факторами, в том числе антропогенного характера [5, 6].

Шалинский район Чеченской Республики характеризуется сложными климатическими условиями, включающими резкие перепады температур, сильные ветры, гололедные явления и высокую грозовую активность. Протяженность ВЛ 0,4 кВ в районе значительна, что увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций. В связи с этим разработка и внедрение эффективных методов прогнозирования повреждений на ВЛ 0,4 кВ представляется актуальной задачей, направленной на минимизацию времени простоя, снижение затрат на эксплуатацию и повышение надежности электроснабжения потребителей.

Традиционные подходы к диагностике состояния ВЛ 0,4 кВ, основанные на периодических визуальных осмотрах и статистическом анализе исторических сведений об отказах, обладают рядом ограничений [7, 8]. Они не позволяют оперативно выявлять потенциальные дефекты и прогнозировать возникновение аварийных ситуаций с достаточной точностью. Применение современных методов машинного обучения, в частности нейронных сетей (НС), открывает новые возможности для предиктивного анализа и прогнозирования повреждений в распределительных сетях.

Использование НС помогает учитывать сложные взаимосвязи между различными факторами, влияющими на состояние ВЛ, и на основе анализа больших объемов информации выявлять скрытые закономерности, которые не поддаются обнаружению с помощью традиционных статистических методов. Разработка и внедрение систем прогнозирования повреждений на основе НС даст возможность перейти от реактивного подхода к обслуживанию электрических сетей к проактивному, базирующемуся на заблаговременном выявлении и устранении потенциальных дефектов [9, 10].

Цель исследования – разработать регрессионную модель на основе нейронной сети, предназначенную для прогнозирования количества и типа повреждений, возникающих на ВЛ 0,4 кВ в условиях Шалинского района.

Материалы и методы. Для обучения и валидации разработанной модели использовали данные о повреждениях ВЛ 0,4 кВ, зафиксированные в период с 2018 по 2023 год (таблица).

Источником информации стали журналы учета повреждений, хранящиеся в районных электрических сетях (РЭС) Шалинского района, основные из которых:

- тип повреждения: обрыв провода, короткое замыкание, повреждение изоляции, повреждение опоры и другие;
- дата и время возникновения повреждения;
- участок повреждения линии;
- метеорологические условия: температура воздуха, наличие осадков, скорость ветра, данные о которых были получены из архивов метеорологической станции, расположенной в Шалинском районе;
- дата ввода в эксплуатацию линии электропередачи;
- срок эксплуатации линии на момент повреждения.

Собранные сведения структурировали и сохранили в формате таблицы *Excel* (таблица). Провели их предварительную обработку, включающую, в том числе удаление дубликатов и пропусков; нормализацию числовых переменных путем масштабирования значений в диапазоне от 0 до 1, позволяющую улучшить сходимость алгоритма обучения НС и предотвратить доминирование переменных с большими значениями и так далее [11].

Для формирования обучающего, валидационного и тестового наборов данные разделили в соотношении 70:15:15 [12, 13].

В качестве базовой архитектуры НС выбрали полносвязную сеть прямого распространения с двумя скрытыми слоями (рис. 1). Выбор этой архитектуры обусловлен ее способностью аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между входными и выходными переменными. Каждый нейрон скрытого слоя использует функцию активации *ReLU* [14, 15].

```
def model_regression():
    model = keras.Sequential([
        keras.layers.Dense(16, activation="relu"),
        keras.layers.Dense(64, activation="relu"),
        keras.layers.Dense(7)
    ])
    model.compile(optimizer="rmsprop", loss="mse", metrics=["mae"])
    return model
```

Рис. 1. Структура нейронной сети
Fig. 1. Neural network architecture

Выходной слой НС состоит из 7 нейронов, каждый из которых соответствует одному из типов повреждений ВЛ 0,4 кВ. Он не имеет функции активации, что позволяет нейронной сети предсказывать значения на непрерывной числовой прямой. Такая конфигурация типична для задач скалярной регрессии [16, 17].

Настройку НС осуществили с применением алгоритма обратного распространения ошибки в комбинации с оптимизатором *RMSProp*. Этот оптимизатор динамически корректирует темп обучения для каждого параметра, базируясь на скользящем

Table				Таблица						
Структурированные данные для обучения и валидации нейросетевой модели прогнозирования										
Structured data for training and validation of a neural network prediction model										
Название линии	Год ввода в эксплуатацию	Год	Месяц	Параметры местности						
				Среднемесячная влажность почвы	Среднемесячная температура почвы	Типы и рельефы местности (равнинная, горная, холмистая)	Средняя высота над уровнем моря	Вид грунта (глина, песок, камень, почва)		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Январь	3,6мм	3	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Февраль	4,2мм	4	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Март	2,4мм	8	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Апрель	1,7мм	15	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Май	0,3мм	19	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Июнь	0,2мм	25	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Июль	0,14мм	30	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Август	0,17мм	31	горно-равнинный	197	почва		
ВЛ 0.4 кВ Ф-1 от ТП 1-16/100кВ ПС "Шаги"	1979	2018	Сентябрь	1,1мм	27	горно-равнинный	197	почва		
Погодные условия				Параметры линии						
Среднемесячное количество дождевых осадков	Среднемесячная температура воздуха	Среднемесячная скорость ветра	Номинальное напряжение(кВ)	Среднемесячная влажность	Средняя длина пролета	Сечение провода	Тип провода	Тип опор (металлические, железобетонные, деревянные, композитные)	Тип изолятора (штырьные, подвесные линейные, проходные, опорные)	Мощность нагрузки, шт/кВА
5,2	3,3	3,8	0,4	67	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
7,9	7,3	3,4	0,4	58	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
19,3	6,8	3,6	0,4	70	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
23,6	17,3	4,9	0,4	49	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
45,2	20,5	3,2	0,4	66	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
74,3	29,3	4,5	0,4	57	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
33,2	25,1	3,3	0,4	45	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
34,9	32,4	4,9	0,4	33	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
14,9	23,5	3,2	0,4	51	30	4x25/2x16/3x16/4x35/2x16	АС/АС/АС/ОП/ОП	5/5/0/	ШФ-10	1/100кВА ПС "Шаги"
ЛИНИИ ВОЛН										
ОБРЫВ ПРОВОДА	ПОВРЕЖДЕНИЕ ИЗОЛЯТОРА	ЗАМЫКАНИЕ ИЗ-ЗА ПТИЦ	ЗАМЫКАНИЕ ИЗ-ЗА РАСТЕНИЙ	ПЕРЕХЛЕСТ ПРОВОДОВ ИЗ-ЗА ТРАВЕРСЫ	ПЕРЕХЛЕСТ ПРОВОДОВ ИЗ-ЗА ПРОВИСА	НЕИСПРАВНОСТЬ РЛНД				
0	2	0	0	0	0	0				
0	0	0	0	0	0	0				
0	1	0	0	0	0	0				
1	0	0	0	2	0	1				
0	0	0	0	0	0	0				
0	4	0	1	1	1	0				
3	0	0	0	0	0	1				
0	0	0	2	0	0	0				
0	1	0	0	0	1	0				

среднем квадратов градиентов [15]. Такой метод способствует более быстрой сходимости оптимизатора к оптимальному решению и снижает вероятность колебаний в ходе тренировочного процесса.

Для определения эффективности функционирования модели использовали метрику средней абсолютной ошибки (*MAE*). Указанная функция обеспечивает оценку качества прогнозирования реальных значений.

Процесс обучения НС выполнили в течение 100 эпох с размером мини пакета в 32 объекта. В ходе оптимизации применили технику ранней остановки,

которая инициирует прекращение итеративной настройки, если значение функции потерь на валидационном наборе информации перестает улучшаться в течение заданного количества эпох. Ранняя остановка позволяет избежать переобучения нейронной модели и повысить ее обобщающую способность [14].

Результаты и обсуждение. Провели исследование НС с различной архитектурой и параметрами. В частности, варьировали количество скрытых слоев $l = 1, 2, 3$ и количество нейронов в каждом слое $n = 16, 32, 64, 128$. Для каждой конфигурации НС осуществили обучение с использованием описанной

выше методики, и оценили качество прогнозирования на валидационном наборе данных.

На рисунке 2 представлены графики обучения для различных вариантов НС, отражающие зависимость значения метрики MAE от числа эпох.

Анализ полученных сведений показал, что увеличение количества нейронов в одном слое с 16 до 32 при наличии только одного скрытого слоя обусловило рост величины MAE с 0,26 до 0,29, что свидетельствует об ухудшении точности прогнозирования (рис. 2а, б).

При использовании двух скрытых слоев наращивание числа нейронов во втором слое при фиксированном количестве нейронов в первом способствовало снижению показателя MAE с 0,34 до 0,20. Это указывает на повышение прогностической способности (рис. 2с-е). При этом увеличение количества нейронов в первом слое не привело к существенному улучшению эффективности функционирования нейронной модели.

Расширение архитектуры до трех слоев вызвало возрастание значения MAE до 0,23, что демонстрирует ухудшение достоверности прогнозирования (рис. 2г, h).

Наилучшие результаты были достигнуты для НС с двумя скрытыми слоями, содержащими 16 и 64 нейрона соответственно (рис. 2е). Данная конфигурация показала величину MAE на уровне 0,20, что служит приемлемым показателем для задачи предсказания повреждений ВЛ 0,4 кВ.

Изложенные выводы подтверждают, что архитектура НС оказывает существенное влияние на точность предсказания. Оптимальная структура зависит от сложности проблематики и объема доступных данных. В рассматриваемом случае нейронная модель с двумя скрытыми слоями и умеренным количеством нейронов продемонстрировала наилучшие характеристики, что может быть связано с тем, что такая архитектура обеспечивает достаточную сложность для аппроксимации зависимостей между входными и выходными переменными, но при этом не способствует переобучению.

Анализ результатов также показал, что наиболее значимыми факторами, влияющими на повреждаемость ВЛ 0,4 кВ в Шалинском районе, служат срок эксплуатации линии, метеорологические условия, в том числе температура воздуха, скорость ветра, наличие осадков и другие. Этот вывод согласуется с общими представлениями о факторах, влияющих на надежность электроснабжения.

Выводы. Разработали и обучили регрессионную модель на основе НС, предназначенной для прогнозирования повреждений на ВЛ 0,4 кВ в условиях

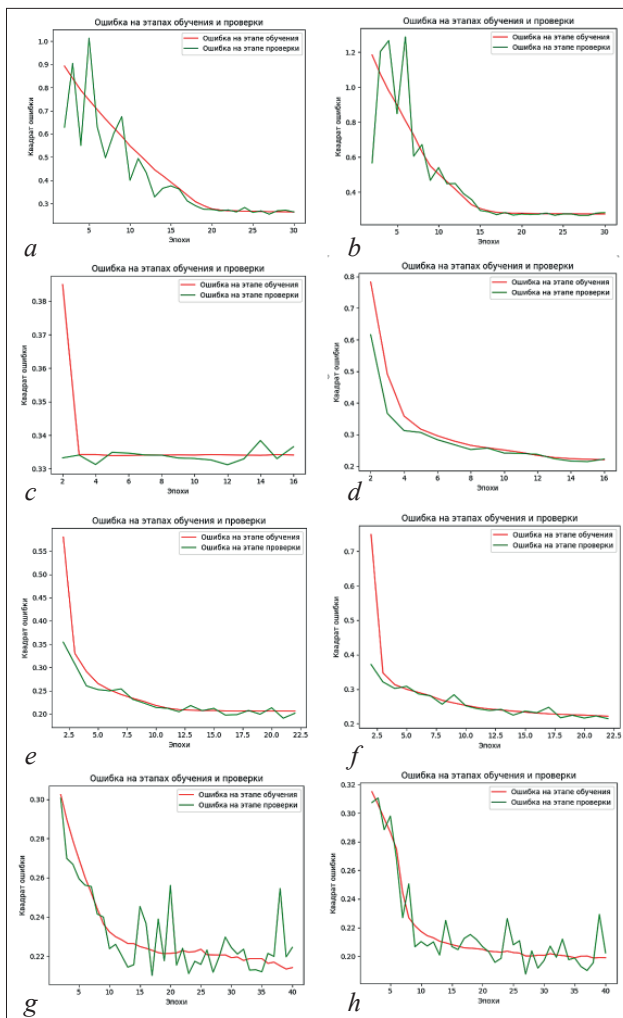


Рис. 2. Результаты обучения нейронной сети с параметрами: а – $l = 1, n = 16, MAE \sim 0,26$; б – $l = 1, n = 32, MAE \sim 0,29$; в – $l = 2, n_1 = 16, n_2 = 16, MAE \sim 0,34$; д – $l = 2, n_1 = 16, n_2 = 32, MAE \sim 0,22$; е – $l = 2, n_1 = 16, n_2 = 64, MAE \sim 0,20$; ф – $l = 2, n_1 = 32, n_2 = 64, MAE \sim 0,21$; г – $l = 3, n_1 = 16, n_2 = 64, n_3 = 64, MAE \sim 0,23$; h – $l = 3, n_1 = 16, n_2 = 64, n_3 = 128, MAE \sim 0,23$

Fig. 2. Neural network training results with parameters: а – $l = 1, n = 16, MAE \sim 0,26$; б – $l = 1, n = 32, MAE \sim 0,29$; в – $l = 2, n_1 = 16, n_2 = 16, MAE \sim 0,34$; д – $l = 2, n_1 = 16, n_2 = 32, MAE \sim 0,22$; е – $l = 2, n_1 = 16, n_2 = 64, MAE \sim 0,20$; ф – $l = 2, n_1 = 32, n_2 = 64, MAE \sim 0,21$; г – $l = 3, n_1 = 16, n_2 = 64, n_3 = 64, MAE \sim 0,23$; h – $l = 3, n_1 = 16, n_2 = 64, n_3 = 128, MAE \sim 0,23$

Шалинского района. Результаты экспериментальных исследований продемонстрировали, что разработанная модель позволяет прогнозировать количество и тип повреждений с приемлемой точностью, что может быть применено для оптимизации планирования ремонтных работ и повышения надежности электроснабжения потребителей.

Выявили наиболее значимые факторы, влияющие на повреждаемость ВЛ 0,4 кВ, что дает возможность

целенаправленно проводить мероприятия по повышению надежности электроснабжения, например, замену устаревшего оборудования или усиление защиты от атмосферных воздействий.

Результаты данной работы могут быть использованы электросетевыми компаниями для повышения эффективности эксплуатации и обслуживания распределительных сетей, снижения затрат на ремонт и повышение надежности электроснабжения потребителей АПК.

Библиографический список

1. Королёв Д.С. Обзор состояния и перспективных направлений развития сельских электрических сетей 0,4 кВ // *Агротехника и энергообеспечение*. 2025. N1(46). С. 47-58. EDN: NPLYSB.
2. Масенко А.В., Жестков В.В. Инновационная структура сельской электрической сети с пониженным уровнем потерь // *Уральский научный вестник*. 2023. Т. 1. N3. С. 67-70. EDN: CWAZXJ.
3. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Обоснование эффективности использования систем накопления электрической энергии в сельских электрических сетях 0,4 кВ // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69. N4(49). С. 120-130. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-4-120-130. EDN: VICNXQ.
4. Якупова М.А. Вопросы энергосбережения в сельских низковольтных электрических сетях при несбалансированном электропотреблении // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. N8(226). С. 89-97. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-226-8-89-97. EDN: GRKNSY.
5. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Анализ плановых и аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N3(56). С. 44-51. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. EDN: VRFTOI.
6. Наумов И.В., Ланин А.В. Прогнозирование отказов сельских распределительных сетей напряжением 10 кВ (на примере филиала восточных электрических сетей ОАО «ИЭСК») // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2011. N1(75). С. 86-90. EDN: NBXBTR.
7. Рысин А.В. Использование математических моделей элементов воздушных линий электропередачи для диагностики оборудования // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2025. Т. 68. N6. С. 557-561. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561. EDN: CMGWYM.
8. Наумов И.В., Васильев Н.В., Ланин А.В. и др. Прогнозирование повреждаемости элементов сельских распределительных сетей 10 кВ (на примере восточных электрических сетей города Иркутска) // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2011. N25. С. 261-266. EDN: NUXMLO.
9. Liao W., Ruan J., Xie Y. et al. Deep learning time pattern attention mechanism-based short-term load forecasting method. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1227979. EDN: PACHQG.
10. Lin G., Zhang H., Chen L. et al. Deep Learning Based Fault Detection and Diagnosis Method for Power Systems. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2025. Vol. 10. Iss. 1. DOI: 10.2478/amns-2025-0200. EDN: BBJPGB.
11. Fristiana A.H., Alfarozi S.A.I., Permanasari A.E. A Survey on Hyperparameters Optimization of Deep Learning for Time Series Classification. *IEEE Access*. 2024. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3516198.
12. Шимохин А.В. Методика определения оптимальных сроков ремонта транспорта с использованием технологии нейронных сетей // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2023. N2(50). С. 153-160. EDN: YYOPXG.
13. Кувайскова Ю.Е., Немыкин А.А. Применение эволюционных и генетических алгоритмов при формировании архитектуры нейросетевых моделей для прогнозирования состояния технического объекта // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2024. Т. 26. N4-3(120). С. 383-394. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(3)-383-394. EDN: MHQLAG.
14. Каширина И.Л., Демченко М.В. Исследование и сравнительный анализ методов оптимизации, используемых при обучении нейронных сетей // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2018. N4. С. 123-132. EDN: YTRTOP.
15. Лешок А.В., Попова Ю.Б. Использование искусственных нейронных сетей для определения износа композиционного фрикционного материала // *Наука и техника*. 2021. Т. 20. N4. С. 345-351. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-345-351. EDN: LJLJUX.
16. Torres J.F., Hadjout D., Sebaa A. et al. Deep Learning for Time Series Forecasting: A Survey. *Big Data*. 2021. Vol. 9. Iss. 1. 3-21. DOI: 10.1089/big.2020.0159.
17. Крутиков А.К. Параллельный алгоритм формирования фрагментированной обучающей выборки для специализированной системы прогнозирования на основе ассемблирования нейросетевых модулей // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2024. N49. С. 61-81. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.04. EDN: KCJGVR.

References

1. Korolev D.S. Review of the state and perspective directions of development of rural electric networks of 0.4 kV. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2025. N1(46). 47-58 (In Russian). EDN: NPLYSB.
2. Masenko A.V., Zhestkov V.V. Innovative Structure of a Rural Electric Grid with Reduced Loss Level. *Ural Scientific Herald*. 2023. Vol. 1. N3. 67-70 (In Russian). EDN: CWAZXJ.
3. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Efficiency of the electric energy storage systems in rural electric grids 0.4 kV. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022. Vol. 69. N4(49). 120-130 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-4-120-130. EDN: VICNXQ.
4. Yakupova M.A. Issues of energy saving in rural low-voltage electrical networks with unbalanced power consumption. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2023. N8(226). 89-97 (In Russian). DOI: 10.53083/1996-4277-2023-226-8-89-97. EDN: GRKNSY.
5. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V. Analysis of planned and emergency outages in rural electrical grids 0.4 kV. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2024. Vol. 71. N3(56). 44-51 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. EDN: VRFTOI.
6. Naumov I.V., Lanin A.V. Forecasting Failures of Rural 10 kV Distribution Grids (on the Example of the Eastern Electric Grids Branch of JSC «IESC»). *Bulletin of Altai State Agrarian University*. 2011. N1(75). 86-90 (In Russian). EDN: NBXBTR.
7. Rysin A.V. The use of mathematical models of overhead power transmission line elements for equipment. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68. N6. 557-561 (In Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561. EDN: CMGWYM.
8. Naumov I.V., Vasilyev N.V., Lanin A.V. et al. Forecasting Damageability of Elements of Rural 10 kV Distribution Grids (on the Example of Eastern Electric Grids of Irkutsk). *Proceedings of St. Petersburg State Agrarian University*. 2011. N25. 261-266 (In Russian). EDN: NUXMLO.
9. Liao W., Ruan J., Xie Y. et al. Deep learning time pattern attention mechanism-based short-term load forecasting method. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1227979. EDN: PACHQG.
10. Lin G., Zhang H., Chen L., et al. Deep Learning Based Fault Detection and Diagnosis Method for Power Systems. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2025. Vol. 10. Iss. 1. DOI: 10.2478/amns-2025-0200. EDN: BBJPGB.
11. Fristiana A.H., Alfarozi S.A.I., Permanasari A.E. A Survey on Hyperparameters Optimization of Deep Learning for Time Series Classification. *IEEE Access*. 2024. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3516198.
12. Shimokhin A.V. Methodology for determining optimal terms of transport repair using neural networks technology. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2023. N2(50). 153-160 (In Russian). EDN: YYOPXG.
13. Kuvayskova Yu.E., Nemykin A.A. Application of evolutionary and genetic algorithms in forming the architecture of neural network models for forecasting the state of a technical object. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2024; 26. N4-3(120). 383-394 (In Russian). DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(3)-383-394. EDN: MHQLAG.
14. Kashirina I.L., Demchenko M.V. Research and comparative analysis of optimization methods used in the teaching of neural networks. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2018. N4. 123-132 (In Russian). EDN: YTRTOP.
15. Liashok A.V., Popova Yu.B. Using artificial neural networks to determine wear of composite friction material. *Science and Technique*. 2021. Vol. 20. N4. 345-351 (In Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-345-351. EDN: LJLJUX.
16. Torres J.F., Hadjout D., Sebaa A. et al. Deep Learning for Time Series Forecasting: A Survey. *Big Data*. 2021. Vol. 9. Iss. 1. 3-21. DOI: 10.1089/big.2020.0159.
17. Krutikov A.K. Parallel algorithm to forming a fragmented training sample for a specialized forecasting system based on assembly of neural network modules. PNRPU Bulletin. *Electrical engineering, information technology, control systems*. 2024. N49. 61-81 (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.04. EDN: KCJGVR.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All the authors have made an equivalent contribution to the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 01.04.2026

Статья принята к публикации 26.05.2026



Моделирование устройства высокочастотной передачи информации по питающей сети

Илья Васильевич Поздняков¹,

аспирант, e-mail: pozdnyakov.200011@mail.ru;

Александр Владимирович Виноградов^{1,2},

доктор технических наук, доцент, профессор;

Вадим Павлович Шарупич¹,

доктор технических наук, доцент, профессор

¹Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, г. Орёл, Российская Федерация;

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Внедрение средств удаленного управления электрооборудованием (электроприемниками) приводит к необходимости подтверждения фактов их включения, отключения, определения текущего состояния (включено, отключено). Это связано с тем, что используемые средства определения состояния электрооборудования опираются на информацию о состоянии контактов коммутационных устройств, например, магнитных пускателей, через которые осуществляются включение и отключение контролируемого электрооборудования. Однако состояние контактов данных устройств не всегда объективно отражает состояние электрооборудования. Например, при обрыве провода после коммутационного устройства возникает ситуация, при которой сигнал диспетчеру приходит о том, что электрооборудование в работе, а фактически оно отключено. Актуальна задача разработки устройств, позволяющих объективно определять состояние оборудования. (Цель исследования) Выполнить расчет параметров и моделирование устройства определения состояния электрооборудования с возможностью передачи информации по питающей сети. (Материалы и методы) Применили общенаучные методы исследования, обзор литературных источников, методы расчета и проектирования устройств передачи информации по питающей сети 380/220 вольт. (Результаты и обсуждение) Осуществили проектирование схемы устройства, передающего данные о состоянии электрооборудования через электрическую сеть 380/220 вольт. Провели расчет электронных компонентов схемы приемника и передатчика информации по сети 220 вольт, произвели моделирование работы соответствующих электронных узлов. (Выводы) Получили результаты моделирования в программе NI Multisim, а также испытаний реального разработанного устройства передачи информации, которые показывают, что обеспечиваются надежный прием и декодирование сообщений, а стабильность работы устройства практически не зависит от количества и видов электрооборудования в сети.

Ключевые слова: система мониторинга, состав работающего электрооборудования, идентификация, электроприемник, инвертор, трансформатор, резонанс.

Для цитирования: Поздняков И.В., Виноградов А.В., Шарупич В.П. Моделирование устройства высокочастотной передачи информации по питающей сети // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 40-49. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-40-49. EDN: FVPRQN.

Scientific article

Simulation of a High-Frequency Information Transmission Device Over a Power Grid

Ilya V. Pozdnyakov¹,

postgraduate, e-mail: pozdnyakov.200011@mail.ru;

Aleksandr V. Vinogradov^{1,2},

Dr.Sc.(Eng.), associate professor, professor;

Vadim P. Sharupich¹,

Dr.Sc.(Eng.), associate professor, professor

¹Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Oryol, Russian Federation;

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The introduction of remote control of electrical equipment (electric receivers) leads to the need to confirm the facts of their switching, determination of the current state (on, off). This is due to the fact that the means used to determine the state of electrical equipment are based on information about the state of contacts of switching devices, for example, magnetic starters, through which the controlled electrical equipment is turned on and off. However, the state of contact of these devices does not always objectively reflect the state of electrical equipment. For example, when the wire breaks after the switching device, a situation arises in which the signal to the dispatcher comes that the electrical equipment is in operation, but in fact it is turned off. The task of developing devices that allow objectively determining the state of the equipment is urgent. (Research purpose) The research purpose is calculating the parameters and modelling the device for determining the state of electrical equipment with the possibility of transmitting information over the power grid. (Materials and methods) General scientific research methods, a review of literary sources, methods for calculating and designing information transmission devices over the 380/220 volts power grid were used. (Results and discussion) We designed a device that transmits data on the state of electrical equipment through an power grid of 380/220 volts. Calculated the electronic components of the receiver and information transmitter circuit over a 220 volt grid, simulated the operation of the corresponding electronic nodes. (Conclusions) We obtained the results of modeling in the NI Multisim program, as well as tests of a real developed information transfer device, which show that reliable reception and decoding of messages are provided, and the stability of the device is practically independent of the number and types of electrical equipment in the grid.*

Keywords: *monitoring system, operating electrical equipment, identification, electrical receiver, inverter, transformer, resonance.*

For citation: Pozdnyakov I.V., Vinogradov A.V., Sharupich V.P. Simulation of a high-frequency information transmission device over a power grid. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 40-49 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-40-49. EDN: FVPRQN.

Проблема распознавания электроприемников (ЭП), электрооборудования (ЭО), подключенных к одной сети, а также выявления их состояния (в работе/не в работе) возникает из-за постоянного роста степени автоматизации технологических процессов. Происходит удаление оператора непосредственно от управляемого ЭО, сведения о состоянии оборудования выводятся на SCADA-системы. Оператор не может визуально, на слух, или иным способом проверить реальное состояние ЭО и вынужден верить информационным сообщениям, индикации на экране.

В случае информационных диверсий, отказов систем мониторинга, сообщающих о состоянии оборудования, создается ситуация, в которой оператор получает ложную информацию. Это приводит к сбоям технологического процесса, выходу из строя ЭО, ЭП (далее речь будет идти об ЭО, но все приведенное будет справедливо и для ЭП).

Ложный сигнал может получить не только оператор, но и система автоматики. Например, в поточной линии сушки или сортировки зерна при останове одного из электродвигателей, предположим привода ленточного транспортера, и отсутствии своевременного сигнала об этом, может произойти завал продукции, появиться другие негативные ситуации, срывающие технологический процесс. Это грозит простоем производства, необходимостью ремонта оборудования, что ведет к экономическому ущербу. Таким образом, возникает необходимость повышения надежности получения информации о состоянии технологического ЭО. Повысить надежность возможно за счет организации дополнительного мониторинга, основанного на контроле параметров, характеризующих состояние ЭО. Это требует создания системы мониторинга состава работающего ЭО.

Способы дополнительного мониторинга широко освещаются в зарубежной литературе. Как правило,

они заключаются в выявлении работающего ЭО путем сопоставления значений измеренных электрических параметров в питающей сети с известными уникальными для контролируемого ЭО значениями. В качестве сопоставляемых параметров используют значения потребляемой мощности, форму кривой тока и напряжения, спектр гармонических составляющих тока и другие.

С целью идентификации электроприемников предлагается, например, составлять рейтинг доминирующих факторов, который анализируется с помощью нейросети. Наиболее значимые факторы – пиковая мощность, средняя активная мощность и максимальная мощность. Наименее значимые факторы – ежедневное потребление электроэнергии и время включения и выключения. Метод обеспечивает точность определения не менее 90% [1].

В течение суток снимаются данные электропотребления каждого ЭО и далее выполняется их сравнение с эталонными при помощи нейросети [2]. Авторы считают наиболее доминирующим фактором активную мощность и коэффициент мощности, но отмечают, что задача может быть решена предлагаемым ими способом только для разнотипного ЭО и при малом их количестве в составе одной сети. Для более сложного состава ЭО требуется большее время для снятия информации и увеличивается число анализируемых факторов [2].

В основе исследования лежат преобразования Вейвлет и Фурье [3]. Они позволяют разложить график измеряемого в сети тока в спектр, а затем посредством перевода его в полярные координаты построить векторные изображения. При этом спектру каждого ЭО присваивается свой цвет. Нейросеть попиксельно распознает изображения и определяет состав работающего ЭО.

Описан способ акустического диагностирования силовых трансформаторов, что дорого, затруднительно и маломобильно [4].

Все вышеописанные способы имеют определенные недостатки. С их помощью затруднительно идентифицировать ЭО, которое имеет схожие или совпадающие характеристики, особенно если ЭО находятся в одном помещении. Для электродвигателей эта проблема может быть решена установкой устройства, описанного в источнике [5]. Оно позволяет включать двигатель лишь при совпадении угла фазы напряжения с заданным, тем самым делая вид переходного процесса прогнозируемым. Однако эта методика дает возможность лишь идентифицировать включение ЭО в сеть, но не позволяет в достаточной мере контролировать его отключение. Для распоз-

навания большого количества ЭО необходима сложная система нейросети, что зачастую экономически нецелесообразно [15]. Кроме того, все указанные выше способы используют только электрические параметры для идентификации ЭО.

Альтернативой может служить применение комбинированной системы идентификации. В этом случае предусматривается установка непосредственно перед ЭО датчиков тока, выявляющих его включение, отключение [6]. На основе получаемой от них информации формируется сигнал, который через специальный передатчик передается в электрическую сеть на высокой частоте, от которой ЭО получает питание. Информация может быть различной, в частности, возможен комбинированный вариант, где происходят акустическая диагностика и передача информации о состоянии по сетевым проводам [7]. Также возможно применение методов электрической диагностики, например по спектру тока [8]. При этом при использовании высокой несущей частоты (десятки и сотни килогерц) с малой амплитудой искажения в сети минимальны и практически незаметны. Количество импульсов и их период могут быть заданы индивидуально для каждого ЭО и его состояний – включен, отключен, ошибка и так далее. На приемной стороне декодированный сигнал передается в систему информирования оператора или систему мониторинга и управления более высокого уровня, позволяя подтверждать факты включения и отключения ЭО. Таким образом, реализуется оригинальный комбинированный способ идентификации – определение фактов включения и отключения по электрическим параметрам и передача информации об этом через сеть, от которой электроприемник получает питание. Этим способ отличается от других комбинированных [9]. Выбор данного способа для передачи сигналов может быть обоснован в случаях, когда прокладка дополнительных проводов связи, применение радиоканалов передачи сведений от датчиков тока нерациональны или невозможны, а импульсы не затухают в сети и стабильно декодируются. Наиболее сложная задача при разработке аналогичных устройств – расчет их выходной и входной части. Передатчик должен обеспечить уровень напряжения, достаточный для декодирования на приемной стороне. Приемник должен иметь низкое входное сопротивление по высокой частоте, и высокое – по низкой, возможность декодирования сигналов независимо от количества и видов ЭО, подключенного к сети.

Цель исследования – выполнить расчет параметров и моделирование устройства определения

состояния электрооборудования с возможностью передачи информации по питающей сети.

Материалы и методы. Применили общенаучные методы исследования, обзор литературных источников, методы расчета и проектирования устройств передачи информации по питающей сети 380/220 В. Проанализировали работы из отечественного и зарубежного сегмента, в которых рассматриваются различные варианты передачи информации по сети 220 В. Использовали базовые законы физики, электротехники.

Предлагается использовать технологии *PLC* и *ZigBee* для анализа состояния оборудования в промышленных зданиях [10]. Предложен вариант обработки сигналов с датчиков и вариант построения сети. Однако не освещена разработка непосредственно аппаратной части приемника и передатчика.

Рассматривается построение систем видеонаблюдения с технологией *PLC*, выбрано подходящее оборудование, но отсутствует расчет параметров и не исследуется вопрос разработки оборудования [11].

Полезная информация содержится в статье, в которой анализируется вариант моделирования цифрового фильтра приемного устройства для устранения колебания на резонансной частоте, но не приводится конфигурация приемного тракта [12].

Общий недостаток всех указанных источников – отсутствие методики по расчету параметров схемы приемной и передающей части устройства передачи сигналов по сети 220 В.

Разработали схему электрической принципиальной приемной и передающей части устройства передачи данных на высокой частоте по сети 220 В (рис. 1).

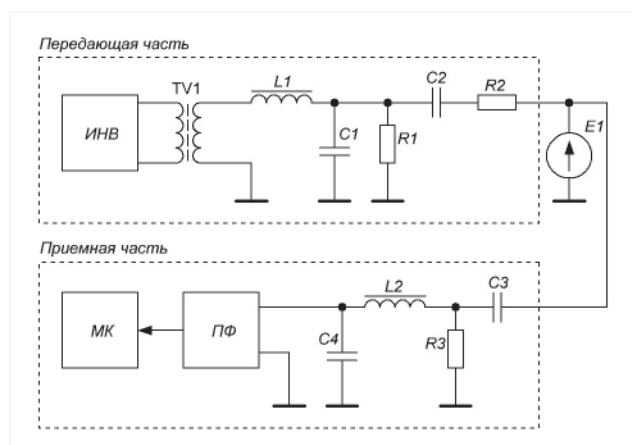


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема

Fig. 1. Principal electrical circuit

Передающая часть содержит инвертор, который формирует прямоугольный сигнал заданной амплитуды. Импульсный трансформатор *ТВ1* понижает

напряжение до приемлемого уровня. Катушка индуктивности *L1* и конденсатор *C1* служат фильтром нижних частот и выделяют первую гармонику прямоугольного сигнала, что превращает прямоугольный сигнал в синусоидальный. Резистором *R1* осуществляется подбор добротности контура для сохранения синусоидальной формы сигнала. Конденсатор *C2* служит разделительным для сигнала высокой частоты инвертора и низкой частоты сети, которая представлена в виде источника напряжения *E1*. Резистор *R2* выступает ограничительным для выхода передатчика, предотвращающим короткое замыкание. В приемной части на входе установлен емкостно-резистивный делитель на базе конденсатора *C3* и резистора *R3*. Его задача – пропустить сигнал высокой частоты и максимально возможно понизить сигнал низкой частоты. Резонансный контур на базе катушки индуктивности *L2* и конденсатора *C4*, настроенный на частоту инвертора, обеспечивает значительный подъем напряжения высокой частоты. Полосовой фильтр окончательно подавляет сигнал низкой частоты и формирует сигнал достаточной амплитуды для обработки микроконтроллером.

Стоит отметить, что приведенный ниже расчет не учитывает влияние емкостных нагрузок, содержащихся в электрической сети, а также импеданса сети, поскольку это труднопрогнозируемые величины, зависящие от множества факторов. Для того чтобы нивелировать влияние внешних факторов, при расчете необходимо закладывать запас по напряжению, току и мощности, так как возможно затухание сигнала в линии.

Расчет инвертора и импульсного трансформатора – задача тривиальная и может быть легко решена с помощью специальных калькуляторов. Аналогично легко посчитать параметры полосового фильтра, который, как правило, реализуется на операционном усилителе.

- Зададимся входными параметрами для расчета:
- рабочая частота инвертора $f_{инв} = 50\,000$ Гц;
 - амплитуда напряжения на выходе трансформатора $U_{ТВ1} = 5,5$ В;
 - максимальная амплитуда тока на выходе трансформатора $I_{ТВ1} = 1$ А;
 - амплитуда напряжения высокой частоты на выходе емкостно-резистивного делителя $U_{R3} = 1$ В;
 - амплитуда напряжения на выходе резонансного фильтра $U_{C4} = 5$ В;
 - индуктивность вторичной обмотки трансформатора $L_{ТВ1} = 1,85$ мкГн.

Расчет элементов схемы начинают с расчета фильтра нижних частот *L1C1*. Как правило, часто-

та среза выбирается в 1,2-1,8 раза больше частоты работы инвертора для того, чтобы амплитуда сигнала не изменялась, но высшие гармоники при этом подавлялись. Пусть частота среза больше рабочей частоты инвертора в 1,5 раза.

Частота среза фильтра на $L1C1$ f_{L1C1} , Гц:

$$\begin{aligned} f_{L1C1} &= 1,5 f_{инв}; \\ f_{L1C1} &= 1,5 \cdot 50\,000 = 75\,000. \end{aligned} \quad (1)$$

Запишем формулу Томсона для резонансной частоты f_{L1C1} , Гц:

$$f_{L1C1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1C1}}. \quad (2)$$

Произведение величин $L1C1$ формулы (2), Гн·Ф:

$$\begin{aligned} L1C1 &= \left(\frac{1}{2\pi f_{L1C1}}\right)^2; \\ L1C1 &= \left(\frac{1}{2\pi \cdot 75\,000}\right)^2 = 4,5 \cdot 10^{-12}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для уменьшения габаритов и снижения стоимости предпочтительно иметь катушку с невысокой индуктивностью (десятки микрогенри). Пусть индуктивность катушки $L1$ составляет 22 мкГн (типовой номинал из ряда $E12$). В этом случае емкость конденсатора $C1$, мкФ:

$$C1 = \frac{4,5 \cdot 10^{-12}}{22 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^6 = 0,2.$$

Выбираем ближайший типовой номинал 0,22 мкФ.

Рассчитаем волновое сопротивление контура $L1C1$, Ом:

$$\rho_{L1C1} = \sqrt{\frac{L1}{C1}}; \quad (4)$$

$$\rho_{L1C1} = \sqrt{\frac{22}{0,22}} = 10 \text{ Ом.}$$

Необходимо определиться с добротностью контура Q_{L1C1} . Добротность обратно пропорциональна скорости затухания собственных колебаний в системе. Чем выше добротность колебательного контура, тем меньше потери энергии за каждый период колебаний и тем медленнее колебания будут затухать [13]. При условии $Q_{L1C1} < 1$ прямоугольная составляющая сигнала подавляется недостаточно, сигнал далек от синусоидального, при условии $Q_{L1C1} > 10$ возможны резонансные выбросы, искажающие синусоидальную форму сигнала. Зададимся добротностью $Q_{L1C1} = 5$.

Выходным сопротивлением контура служит сопротивление резистора $R1$. Выходное сопротивление связано с добротностью и волновым сопротивлением контура через соотношение $R1$, Ом:

$$\begin{aligned} R1 &= Q_{L1C1} \rho_{L1C1}; \\ R1 &= 5 \cdot 10 = 50. \end{aligned} \quad (5)$$

Полное сопротивление параллельного соединения $C1R1$, Ом:

$$Z_{C1R1} = \frac{\frac{1}{2\pi f_{инв} C1} R1}{\frac{1}{2\pi f_{инв} C1} + R1}; \quad (6)$$

$$Z_{C1R1} = \frac{1}{\frac{2\pi \cdot 50\,000 \cdot 0,22 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{1} + 50} = 11,2.$$

Полное сопротивление цепи $L1C1R1$ Z_{L1C1R1} , Ом:

$$Z_{L1C1R1} = 2\pi f_{инв} L1 + Z_{C1R1};$$

$$Z_{L1C1R1} = 2\pi \cdot 50\,000 \cdot 22 \cdot 10^{-6} + 11,2 = 18,1. \quad (7)$$

Ток, потребляемый контуром I_{R1C1L1} , А:

$$I_{R1C1L1} = \frac{U_{TV1}}{Z_{L1C1R1}}; \quad (8)$$

$$I_{R1C1L1} = \frac{10}{18,1} = 0,55.$$

Ток не превышает максимально допустимый ток на выходе трансформатора.

Напряжение на резисторе $R1$, В:

$$U_{R1} = \frac{U_{TV1}}{\sqrt{(1 - (2\pi f)^2 L1C1)^2 + \left(\frac{2\pi f L1}{R1}\right)^2}}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_{R1} &= \frac{5,5}{\sqrt{(1 - (2\pi \cdot 50\,000)^2 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot 0,22 \cdot 10^{-6})^2 +}} \\ &\frac{5,5}{\sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot 50\,000 \cdot 22 \cdot 10^{-6}}{50}\right)^2}} = 10. \end{aligned}$$

Ток через резистор $R1$, А:

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{\sqrt{(2\pi f_{инв} L1)^2 + R1^2}}; \quad (10)$$

$$I_{R1} = \frac{10}{\sqrt{(2\pi \cdot 50\,000 \cdot 22 \cdot 10^{-6})^2 + 50^2}} = 0,19.$$

Мощность на резисторе $R1$, Вт:

$$P_{R1} = I_{R1}^2 R1;$$

$$P_{R1} = 0,19^2 \cdot 50 = 1,8. \quad (11)$$

Использовали два резистора типоразмера 2512 с сопротивлением 100 Ом, соединенных параллельно.

Сопротивление ограничительного резистора $R2$, Ом:

$$R2 = U_{R1} / I_{TV1};$$

$$R2 = 10 / 1 = 10. \quad (12)$$

Максимально допустимый ток в линии с учетом приемника $I_{л}$, А:

$$I_{л} = I_{TV1} - I_{R1C1L1};$$

$$I_{л} = 1 - 0,55 = 0,45. \quad (13)$$

Емкость разделительного конденсатора $C2$ для аналогичных схем, как правило, лежит в диапазоне 0,047 – 1 мкФ. Поскольку ранее уже был использован

конденсатор на 0,22 мкФ, то с точки зрения технологичности целесообразно применить его. Ток в цепи $L1C2R2TV1$ на частоте $f_{сети} = 50$ Гц при напряжении $U_{сети} = 220$ В, А:

$$I_{L1C2R2TV1} = \frac{U_{сети}}{\sqrt{R2^2 + \left(2\pi f_{сети}(L1 + LTV1) - \frac{1}{2\pi f_{сети}C2}\right)^2}}; \quad (14)$$

$$I_{L1C2R2TV1} = \frac{220}{\sqrt{10^2 + \left(2\pi \cdot 50(22 + 1,85) \cdot 10^{-6} - \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,22 \cdot 10^{-6}}\right)^2}}$$

$$\frac{220}{\sqrt{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,22 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} = 0,015.$$

Таким образом, $I_{L1C2R2TV1} < I_{TV1}$, значит, напряжение сети эффективно подавляется в высокочастотной части передатчика, что способствует нормальной работе трансформатора и остальных элементов.

Емкость конденсатора $C3$ выбирается из соображений, что он должен практически без потерь пропускать сигнал высокой частоты и максимально блокировать сигнал низкой частоты сети. Реактивное сопротивление цепи на высокой частоте складывается из реактивных сопротивлений конденсатора $C2$ и $C3$. При последовательном соединении конденсаторов их суммарная емкость уменьшается. Исходя из этого для того, чтобы конденсатор $C3$ не влиял на сигнал высокой частоты его емкость должна бытькратно больше емкости конденсатора $C2$. Из имеющихся в продаже наиболее хорошо для данной цели подходит конденсатор емкостью 10 мкФ. Рассчитаем полное сопротивление цепи $C2R2C3$ Z_{C2R2C3} , Ом:

$$Z_{C2R2C3} = \sqrt{\left(2\pi f_{инв} \left(\frac{C2C3}{C2+C3}\right)\right)^2 + R2^2}; \quad (15)$$

$$Z_{C2R2C3} = \sqrt{\left(2\pi \cdot 50000 \cdot 10^{-6} \left(\frac{10 \cdot 0,22}{10 + 0,22}\right)\right)^2 + 10^2} = 10.$$

Сопротивление резистора $R3$, Ом:

$$R3 = \frac{Z_{C2R2C3}}{\frac{U_{R1}}{U_{R3}} - 1}; \quad (16)$$

$$R3 = \frac{10}{\frac{10}{1} - 1} = 1,1.$$

Мощность на резисторе $R3$, Вт:

$$P_{R3} = \frac{U_{R3}^2}{R3}; \quad (17)$$

$$P_{R3} = \frac{1^2}{1,1} = 0,9.$$

Выбрали резистор на 1 Ом из стандартного ряда типоразмера 2512.

Волновое сопротивление контура $L2C4$ ρ_{L2C4} , Ом:

$$\rho_{L2C4} = \frac{U_{C4}}{U_{R3}} R3; \quad (18)$$

$$\rho_{L2C4} = \frac{5}{1} \cdot 1 = 5.$$

Запишем систему уравнений для расчета параметров контура:

$$\begin{cases} f_{инв} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L2C4}} \\ \rho_{L2C4} = \sqrt{\frac{L2}{C4}} \end{cases}; \quad (19)$$

$$\begin{cases} 50\,000 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L2C4}} \\ 5 = \sqrt{\frac{L2}{C4}} \end{cases}.$$

Решая систему, получим значения $L2 = 16$ мкГн, $C4 = 0,64$ мкФ. Пересчитаем волновое сопротивление и резонансную частоту с учетом стандартных номиналов 22 мкГн и 0,47 мкФ:

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{22 \cdot 10^{-6} \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}}} = 49495 \text{ Гц} \\ \sqrt{\frac{22 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}}} = 6,8 \text{ Ом} \end{cases}.$$

Значения приемлемы, а усиление контура получится даже несколько больше, чем требуется, что скажется благоприятно на детектировании.

Результаты и обсуждение. Выполнили моделирование схем разработанного устройства (приемника и передатчика) в программном продукте *NI Multisim*. Стоит отметить, что воссоздать реальные условия электрической сети при компьютерном моделировании практически невозможно. Они зависят от ряда факторов: типов ЭО, количества, типа помещения, импеданса электрической сети.

Наибольшую проблему для передачи информации по сетевым проводам представляют потребители с емкостным входом, поскольку на высокой частоте с ростом емкости уменьшается полное сопротивление цепи, что способствует затуханию сигнала. Такие потребители – компьютеры, роутеры и любые потребители, имеющие в своем составе импульсный источник питания [14].

Схема приемной и передающей части в *NI Multisim* показана на **рисунке 2**.

В ходе эксперимента изменяется значение емкости конденсатора $C_{сети}$ в диапазоне от 0 до 50 мкФ с шагом 5 мкФ. Данный конденсатор симулирует входные цепи импульсных источников питания, включенных в сеть. Фиксируются значения напря-

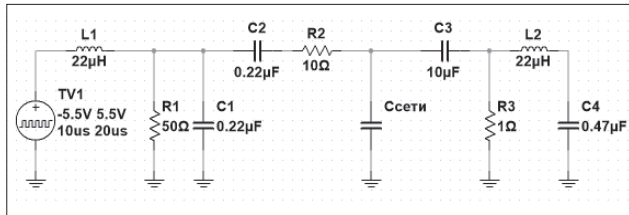


Рис. 2. Схема приемной и передающей части в NI Multisim
Fig. 2. Receiving and transmitting part in NI Multisim

жения на конденсаторе $C4$. На *рисунке 3* приведен график зависимости напряжения на выходе приемной части от входной емкости потребителей.

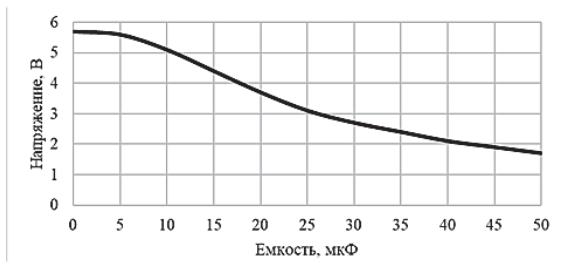


Рис. 3. Зависимость напряжения на выходе приемной части от входной емкости потребителей
Fig. 3. Dependence of voltage at the output of the receiving part on the input capacity of consumers

Из графика на *рис. 3* видно, что даже при относительно большой входной емкости ЭО напряжение на выходе контура приемника имеет достаточную величину для обработки с помощью микроконтроллера и полосового фильтра.

Разработали и изготовили по представленной выше схеме (*рис. 1*) экспериментальный образец устройства. По итогам его испытаний оказалось, что на затухание в значительной степени влияет импеданс сети. Впрочем, его влияние незначительно уменьшило напряжение на выходе приемной части, а уровень напряжения оказался вполне достаточным для дальнейшей обработки. На *рисунке 4* представлены осциллограмма и спектральный состав напряжения в сети при включенном передатчике. Осциллографирование провели с делителем 1:100.

Из *рисунка 4* видно, что в сеть поступает напряжение с действующим значением 1 В, этого достаточно для детектирования. На *рисунке 5* приведены осциллограмма и спектральный состав напряжения на выходе резонансного контура $L2C4$. Для измерения использовали делитель 1:10.

Из *рисунка 5* видно, что после резонансного контура напряжение по-прежнему остается на уровне 1 В, несмотря на падение на емкостно-резистивном делителе, однако напряжение с частотой 50 Гц (в сравнении с *рис. 4*) практически полностью пода-



Рис. 4. Осциллограмма и спектральный состав напряжения в сети при включенном передатчике
Fig. 4. Oscillogram and spectral composition of voltage in the grid with the transmitter on



Рис. 5. Осциллограмма и спектральный состав напряжения на выходе резонансного контура $L2C4$
Fig. 5. Oscillogram and spectral composition of voltage at the output of the resonant circuit $L2C4$

вляется, а напряжение высокой частоты с частотой 50 кГц доминирует в спектральной составляющей сигнала. При этом сигнал понижен до уровня, приемлемого для обработки полосовым фильтром и микроконтроллером.

Разработанное устройство продемонстрировало свою работоспособность. Его испытания подтвердили результаты расчетов и моделирования и показали, что обеспечивается надежный прием и декодирование сообщений, а стабильность работы устройства практически не зависит от количества и видов установленного электрооборудования в сети.

Выводы. Удаленность оператора, управляющего технологическим оборудованием, от оборудования, возможность неверного предоставления информации о рабочем и отключенном состоянии оборудования в SCADA-системы приводит к необходимости идентификации состава работающего электрооборудования, его запуска и останова. Такую идентификацию можно реализовать следующим спо-

собом. На оборудование устанавливаются датчики тока, выявляющие его включение, отключение. На основании получаемой от датчиков информации формируется сигнал, передаваемый в сеть 220 В, от которой электроприемник получает питание. Сигнал на приемной стороне передается в систему мониторинга состава работающего электрооборудования, позволяя подтверждать факты включения и отключения электрооборудования. Главная проблема при реализации подобной системы – отсутствие методики расчета электрических параметров схемы приемника и передатчика.

Привели пример расчета приемного и передающего тракта устройства. Моделирование схемы тракта с учетом влияния входных емкостей потребителей сети показало, что система вполне устойчива и позволяет стабильно декодировать принимаемые импульсы. При испытании экспериментального образца устройства выяснилось, что на качество передачи влияют тип электрической сети, количество потребителей, импеданс сети, что труднопрогнозируемо. Однако эти факторы не помешали получить на выходе приемника сигнал уровня, достаточного для дальнейшей обработки микроконтроллером.

Подтвердили результаты расчетов и моделирования, испытания устройства показали, что обеспечиваются надежный прием и декодирование сообщений, а стабильность работы устройства практически не зависит от количества и видов установленного электрооборудования в сети.

Библиографический список

1. Tundis A., Faizan A., Mühlhäuser M. A Feature-Based Model for the Identification of Electrical Devices in Smart Environments. *Sensors*. 2019. Vol. 19. Iss. 11. 2611. DOI: 10.3390/s19112611.
2. Abeykoon V., Kankanamdurage N., Senevirathna A. et al. Electrical Devices Identification Through Power Consumption Using Machine Learning Techniques. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. 2020. DOI: 10.5013/ijssst.a.17.32.13. EDN: EFUZSR.
3. He N., Liu D., Zhang Z. et al. Learning-Based Non-Intrusive Electric Load Monitoring for Smart Energy Management. *Sensors*. 2024. Vol. 24. Iss. 10. 3109. DOI: 10.3390/s24103109. EDN: ODAYMH.
4. Панов А.Н., Бодров Е.Э., Лысенко А.А. и др. Применение направленного микрофона для диагностики технического состояния электропривода по его акустической вибрации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. N4(45). С. 58-63. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-58-63. EDN: NSPGBD.
5. Виноградов А.В., Поздняков И.В. Разработка устройства идентификации асинхронных электродвигателей при их пуске // *Техника и оборудование для села*. 2025. N6(636). С. 39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-6-39-43. EDN: GVWAQL.
6. Поздняков И.В. Выбор способа идентификации электроприемников в электрической сети на примере животноводческой фермы на базе «ОС» «Стрелецкая» // *Агротехника и энергообеспечение*. 2025. N1(46). С. 39-46. EDN: YLROQD.
7. Бирюков А.Э., Сорокин Д.Г., Лысов Н.В. и др. Диагностический алгоритм анализа тока асинхронных электродвигателей, основанный на методиках оценки годографа и частотного спектра // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2023. N4(80). С. 88-101. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).88-101. EDN: DPJMPV.
8. Zhang H.X., Liu J., Xu Ju. et al. Electromagnetic radiation-based IC device identification and verification using deep learning. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*. 2020. Vol. 2020. Iss. 1. 206. DOI: 10.1186/s13638-020-01808-z. EDN: LWAIQX.
9. Виноградов А.В., Поздняков И.В. Обоснование разработки комбинированного метода идентификации электроприемников в электрической сети и средств его реализации // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. N1(58). С. 33-40. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-1-33-40. EDN: EVULMM.
10. Брянкин И.В., Гришин В.М. Система мониторинга технического состояния зданий // *Проблемы автоматизации и управления*. 2014. N1(26). С. 144-155. EDN: WMRNTL.
11. Жучков И.А., Гордеева Д.А. Синтез цифрового фильтра для приемной части PLC-модема с двухчастотной FSK-модуляцией // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР*. 2024. N1-1. С. 58-61. EDN: WUSZEN.
12. Татуйко П.С. Математическое описание режимов работы резонансного преобразователя напряжения с последовательным LC-резонансным контуром // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2022. N1(15). С. 73-79. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-1-73-79. EDN: ZFTRQG.
13. Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Карандаева О.И. и др. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: энергетика*.

2008. N26(126). С. 26-31. EDN: JWKAML.

14. Медведева С.Н., Чернецов М.В., Чернецова М.М. Метод идентификации потребителей электроэнергии, генерирующих в сетях общего электроснабжения помехи, превышающие нормированные значения показателей качества // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2020. N2(34). С. 121-131. DOI: 10.21685/2227-8486-2020-2-9. EDN: VUKBFB.

References

1. Tundis A., Faizan A., Mühlhäuser M. A Feature-Based Model for the Identification of Electrical Devices in Smart Environments. *Sensors*. 2019. Vol. 19. Iss. 11. 2611. DOI: 10.3390/s19112611.
2. Abeykoon V., Kankanamdurage N., Senevirathna A. et al. Electrical Devices Identification Through Power Consumption Using Machine Learning Techniques. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. 2020. DOI: 10.5013/ijssst.a.17.32.13. EDN: EFUZR.
3. He N., Liu D., Zhang Z. et al. Learning-Based Non-Intrusive Electric Load Monitoring for Smart Energy Management. *Sensors*. 2024. Vol. 24. Iss. 10. 3109. DOI: 10.3390/s24103109. EDN: ODAYMH.
4. Panov A.N., Bodrov E.E., Lysenko A.A. et al. Diagnostics of electric drive by its acoustic vibration using a condenser microphone. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2019. N4(45). 58-63 (In Russian). DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-58-63. EDN: NSPGBD.
5. Vinogradov A.V., Pozdnyakov I.V. Development of a device for identifying asynchronous electric motors during their start-up. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025. N6(636). 39-43 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2025-6-39-43. EDN: GVWAQL.
6. Pozdnyakov I.V. Selection of the method of identification of electric receivers in the electric network on the example of a cattle farm on the basis of “OS” “Streletskaaya”. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2025. N1(46). 39-46 (In Russian). EDN: YLROQD.
7. Biryukov A.E., Sorokin D.G., Lysov N.V. et al. Diagnostic algorithm for analysis of induction motors current based on a hodograph estimation of the generalized current vector and frequency spectra. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2023. N4(80). 88-101 (In Russian). DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).88-101. EDN: DPJMPV.
8. Zhang H.X., Liu J., Xu Ju. et al. Electromagnetic radiation-based IC device identification and verification using deep learning. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*. 2020. Vol. 2020. Iss. 1. 206. DOI: 10.1186/s13638-020-01808-z. EDN: LWAIXQ.
9. Vinogradov A.V., Pozdnyakov I.V. Substantiation of the development of a combined method of identification of electrical receivers in a power grid and means of its implementation. *Electrical Engineering and Equipment in Agriculture*. 2025. Vol. 72. N1(58). 33-40 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-1-33-40. EDN: EVULMM.
10. Briakin I.V., Grishin V.M. Monitoring system of technical state of buildings. *Problems of Automation and Control*. 2014. N1(26). 144-155 (In Russian). EDN: WMRNTL.
11. Zhuchkov I.A., Gordeeva D.A. Synthesis of a digital filter for the receiving part of a PLC modem with dual-frequency FSK modulation. *Collection of selected articles from the TUSUR scientific session*. 2024. N1-1. 58-61 (In Russian). EDN: WUSZEH.
12. Tatuyko P. Model of managing processes of engineering changes in products at an industrial enterprise. *Automation and Modelling in Design and Management*. 2022. N1(15). 73-79. (In Russian). DOI: 10.30987/2658-6436-2022-1-73-79. EDN: ZFTRQG.
13. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I. et al. Monitoring of technical condition of power transformers with the method of acoustical diagnosing. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2008. N26(126). 26-31 (In Russian). EDN: JWKAML.
14. Medvedeva S.N., Chernetsov M.V., Chernetsova M.M. The method of identifying consumers of electricity, generation in the public electricity supply disturbance in excess of normalized values of indicators of quality. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020. N2(34). С. 121-131 (In Russian). DOI: 10.21685/2227-8486-2020-2-9. EDN: VUKBFB.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Поздняков И.В. – подготовка и анализ материалов и методов, разработка схем и устройства, испытания, анализ полученных результатов, подготовка текста;

Виноградов А.В. – научное руководство, критический анализ и доработка текста, участие в подготовке материалов и методов;

Шарупич В.П. – участие в подготовке материалов и методов, обсуждении результатов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Pozdnyakov I.V. – preparation and analysis of materials and methods, development of schemes and devices, testing, analysis of the results, preparation of the text;

Vinogradov A.V. – scientific guidance, critical analysis and revision of the text, participation in the preparation of materials and methods;

Sharupich V.P. – participation in the preparation of materials and methods, discussion of results.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 03.04.2026

Статья принята к публикации 25.06.2026



Однопроводная полуволновая резонансная передача электроэнергии на повышенной частоте

Леонид Юрьевич Юферев,

доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: Leouf@yandex.ru;

Олег Алексеевич Рошин,

кандидат технических наук, ведущий специалист, e-mail: Olerosh@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. В настоящее время известны две основные системы передачи электрической энергии на постоянном и переменном напряжении с частотой 50 Гц. Известно, что использование повышенного напряжения для передачи электроэнергии является экономически выгодным. Исходя из этого, высоковольтная линия на постоянном напряжении наиболее эффективна, поскольку содержит только два провода, а в линии наблюдаются исключительно омические потери. В то же время известно, что существует принципиальная возможность передачи энергии по сверхдальним линиям полуволнового типа, настроенных на полуволну электропередачи. (Цель исследования) Показать возможность и преимущества передачи электроэнергии в полуволновом режиме. (Материалы и методы) Проведен анализ отечественных и зарубежных научных литературных источников и патентов посредством аспектного метода, определены основные технические и технологические возможности повышения эффективности линий электропередачи, работающих в полуволновом режиме, а также обоснован принцип действия полуволновых линий, работающих в диапазоне повышенной частоты. (Результаты и обсуждение) Составлена схема замещения полуволновой линии электропередачи, определены параметры рабочей точки, обоснована актуальность применения данных систем передачи для маломощных потребителей. (Выводы) Дальнейшие исследования и разработка полуволновых маломощных линий электропередачи для электроснабжения расположенных вдалеке садоводческих товариществ, торговых точек, малых предприятий, коттеджей, фермерских хозяйств и др. в настоящее время являются весьма актуальными.

Ключевые слова: полуволновая линия электропередачи, электроснабжение сельскохозяйственных потребителей, повышенная частота, схема замещения, сооружения и реконструкция распределительных сетей.

Для цитирования: Юферев Л.Ю., Рошин О.А. Однопроводная полуволновая резонансная передача электроэнергии на повышенной частоте // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 50-56. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-50-56. EDN: PACRUL.

Scientific article

Single-wire Half-wave Resonant Transmission of Electricity at an Increased Frequency

Leonid Yu. Yuferev,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;

Oleg A. Roshchin,

Ph.D.(Eng.), leading specialist

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Currently, there are two main systems for transmitting electrical energy at direct and alternating current with a frequency of 50 Hz. It is known that the use of increased voltage for the transmission of electricity is economically advantageous. Based on this, a high-voltage line of direct current is the most efficient, since

it contains only two wires, and only ohmic losses are observed in the line. At the same time, it is known that there is a fundamental possibility of transmitting energy over ultra-long half-wave lines tuned to a half-wave power transmission. (Research Purpose) The research purpose is studying the possibility and advantages of transmitting electricity in half-wave mode. (Materials and methods) The analysis of domestic and foreign scientific literature sources and patents by means of the aspect method is carried out, the main technical and technological possibilities of increasing the efficiency of power transmission lines operating in half-wave mode are determined, and the principle of operation of half-wave lines operating in the high frequency range is substantiated. (Results and discussion) A half-wave power transmission line replacement scheme has been drawn up, the parameters of the operating point have been determined, and the relevance of using these transmission systems for low-power consumers has been substantiated. (Conclusions) Further research and development of half-wave low-power power transmission lines for power supply to horticultural associations, retail outlets, small businesses, cottages, farms, etc. located in the distance currently are very relevant.

Keywords: half-wave power transmission line, power supply for agricultural consumers, increased frequency, replacement scheme, construction and reconstruction of distribution grids.

For citation: Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Single-wire half-wave resonant transmission of electricity at an increased frequency. *Electrical Technology and Electrical Equipment in Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 50-56 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-50-56. EDN: PACRUL.

В современной энергетике применяются две системы энергопередачи: одна функционирует на постоянном напряжении, другая – на переменном напряжении с частотой 50 Гц. Известно, что высоковольтная линия на постоянном напряжении более экономична, поскольку в ней лишь два провода и исключительно омические потери [1].

В линии переменного напряжения – трехпроводная или четырехпроводная линии, а кроме омических потерь (как в линиях постоянного тока) присутствуют реактивные, ёмкостные, индуктивные потери. Однако при этом переход с высокого напряжения на низкое (бытовое напряжение 50 Гц) значительно проще и дешевле, в виду этого принята и применяется система передачи электроэнергии на переменном напряжении с частотой 50 Гц [1].

Теоретически передача электрической энергии на переменном напряжении может быть так же экономична, как и на постоянном напряжении, а в отдельных режимах и значительно превосходить передачу на постоянном напряжении. Эта система передачи электроэнергии на переменном напряжении представляет собой передачу в волновом или полуволновом режимах (ПЭП). Электрическая волна в передающей линии на частоте 50 Гц образуется при длине линии 6000 км, а полуволна – при длине линии 3000 км (при частоте 60 Гц длина полуволновой линии равна 2400 км), такие линии называются дальними и сверхдальними линиями [2].

Цель исследования – показать возможность и преимущества передачи электроэнергии в полуволновом режиме.

Материалы и методы. Проведен анализ отечественных и зарубежных научных литературных источников и патентов посредством аспектного метода и определены основные технические и технологические возможности повышения эффективности линий электропередачи, работающих в полуволновом режиме, а также обоснован принцип действия полуволновых линий, работающих на повышенной частоте.

В декабре 1921 года IX Всероссийский съезд Советов утвердил декрет Совета народных комиссаров РСФСР «Об электрификации Р.С.Ф.С.Р.», который вносил коррективы в план ГОЭЛРО.

Учёные советской эпохи, учитывая огромные территории нашей страны, рассматривали дальние и сверхдальние линии электропередачи и как линии волнового или полуволнового типа с частотой 50 Гц [3].

Идея создания дальних и сверхдальних линий полуволнового типа, настроенных на полуволну (на угол 180°), для обеспечения высокого уровня работы и экономии электропередачи была отмечена в работах Яворского В.В., Чернышёва Е.А., Вульфа А.А., Костенко М.П., Веникова В.А., Щербакова В.К. и др. Значительное внимание было уделено этой проблеме перед Великой Отечественной войной в связи со строительством Куйбышевского гидроузла и передачи энергии от него в Москву.

На начальном этапе исследований была доказана возможность передачи энергии по сверхдальним линиям полуволнового типа, настроенных на полуволну электропередачи [4].

Фундаментальные систематические исследования в области сверхдальних электропередач полуволно-

вого типа начали проводиться в Сибирском НИИ Энергетики (СибНИИЭ) с 1956 года под руководством основателя школы сибирских электроэнергетиков, профессора В.К. Щербакова. Тогда уже существовала проблема передачи мощности 5000-6000 МВт на 2000-3000 км, и рассматривались возможности для разработки новой технологии передачи электроэнергии с параметрами, схемами, режимами и, самое главное, с экономическими характеристиками, гарантирующими рентабельность сооружения таких магистралей [4].

Программа эксперимента была предварительно проверена на электродинамической модели СибНИИЭ в присутствии членов комиссии по проведению испытаний [5].

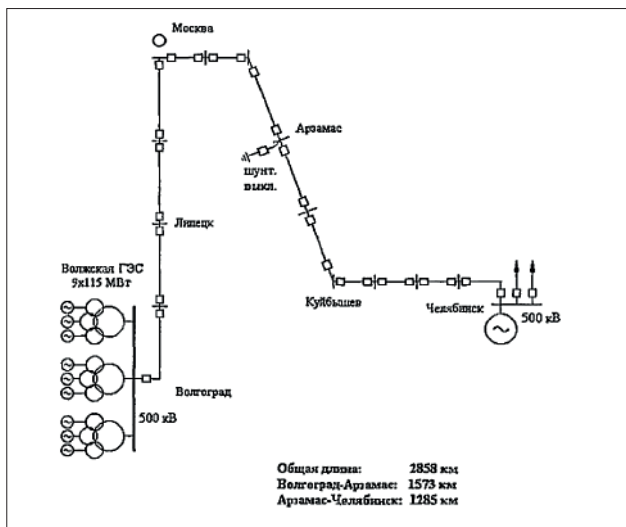


Рис. 1. Схема для испытаний ПЭП в сети 500 кВ

Fig. 1. Test circuit for half-wave electricity transmission in a 500 kV grid

Во время испытаний девять гидрогенераторов Волжской ГЭС с номинальной мощностью 115 МВт каждый через линию 500 кВ с электрической длиной $\lambda = 0,97$ должны были снабжать энергией шины Челябинской энергосистемы (рис. 1). Если рассматривать реактивные сопротивления трансформаторов ГЭС и реактивное сопротивление приемной системы в качестве настраивающих индуктивностей, то эквивалентная электрическая длина электропередачи возрастала до $\lambda = 1,05 \pi$.

В целом испытания ПЭП Волгоград – Урал прошли успешно и дали основания для следующих выводов [6]:

1. По линии длиной около 3000 км при минимальной степени перестройки обеспечивалась устойчивая передача мощности в диапазоне изменения нагрузки вплоть до натуральной мощности. По условиям устойчивости имелась возможность дальнейшего

повышения передаваемой мощности. ПЭП эффективно управлялась в рамках текущих процессов, затруднений в работе серийного оборудования с напряжением 500 кВ не наблюдалось.

2. Испытания подтвердили теоретические выводы о том, что полуволновые электропередачи работоспособны и могут быть использованы для передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния.

3. Эффективность ПЭП сохраняется при отсутствии демпфирования в их режимах.

4. Проверена особенность регулирования нормального режима ПЭП и подтверждена возможность обеспечения устойчивой работы и подавления самораскачивания при недостаточных углах настройки с помощью АРВ СД.

5. Испытания ПЭП в аварийных режимах в условиях холостого хода и под нагрузкой показали высокую её устойчивость при динамических переходах, а внутренние перенапряжения, возникающие в этих режимах, не превосходили расчётного уровня изоляции электропередачи с напряжением 500 кВ.

По результатам испытаний ПЭП в сетях 500 кВ на совместном заседании бюро научного Совета «Энергетика и электрификация» и секции «Электроэнергетика» Государственным комитетом по науке и технике (ГКНТ) 12 марта 1968 года было принято решение, в котором одобрялась работа, проведенная СибНИИЭ в области полуволновых и настроенных на полуволну электропередач. Одновременно указывалось, что создание сверхдальних электропередач полуволнового типа возможно при устранении ряда замечаний, ликвидация которых возлагалась на институты «Энергосетьпроект», СибНИИЭ и ВЭИ [6].

В апреле 1969 года СибНИИЭ совместно с головным институтом «Энергосетьпроект» провёл в Новосибирске Всесоюзный семинар по оптимизации и настройке электропередачи. Цель – подвести итог проделанной работе. Было отмечено, что продолжение работ в области сверхдальних электропередач полуволнового типа применительно к конкретным вариантам схемы сети 1150 кВ Единой энергосистемы страны целесообразно.

В июне 1971 года на бюро секции по электроэнергетике научного Совета «Энергетика и электрификация» ГКНТ был заслушан доклад директора СибНИИЭ, профессора Щербакова В.К. «Передача энергии на сверхдальние расстояния по настроенным линиям (вариант схемы ЕЭС страны на переменном токе)» и отмечено, что полуволновые линии являются перспективными для передачи электроэнергии на переменном токе на расстояния 2000-3000 км.

В 1977 году было принято правительственное решение о сооружении уникальной ЛЭП переменного тока с напряжением 1150 кВ Сибирь – Казахстан – Урал (от Итата через Экибастуз до Челябинска) протяженностью 2344 км. Это была первая в мире ЛЭП УВН. К 1991 году было завершено строительство основной части ЛЭП (от Барнаула до Челябинска), а к 1998 году – от Барнаула до Итата. Однако после 1991 года ЛЭП была переведена на напряжение 500 кВ из-за возникших сложных технических проблем, вызывающих отключение оборудования, а также резкого снижения спроса на электроэнергию.

Вместе с тем волновая природа полуволновых линий вносит свои особенности в нормальные и аварийные режимы, придаёт им необычный характер и вызывает необходимость пересмотреть сложившуюся точку зрения при решении вопросов устойчивости, защиты от внутренних перенапряжений, релейной защиты, системной автоматики и др. [8].

Одновременно необходимо отметить, что Россия теряет научно-технические и производственные компетенции в разработке технологий передачи электроэнергии на ультравысоком напряжении и испытывает затруднения с развитием соответствующего электросетевого оборудования, при этом утрачена и научно-технологическая база.

Кроме российских ученых, зарубежные исследователи также проявляют интерес к передаче электроэнергии данным способом. Известно, что существовал проект энергетического коридора для передачи электроэнергии в Африке, данная система также была озвучена на энергетических конференциях в Англии.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим полуволновый режим линии электропередачи. При длине волны, соизмеримой с длиной линии, закон Ома недостаточен для расчёта линии, так как в линии появляются свободные электромагнитные волны. Это связано с тем, что LC в линии уже не точечные как в обычной НЧ-схеме, а погонные, то есть линию с физической точки зрения можно представить как набор элементарных LC -контуров. При рассмотрении элементарного контура возник аппарат для расчёта проводных волноводов, изначально разработанный Хевисайдом, а впоследствии расширенный и дополненный [7].

Следует отметить, что для расчёта проводных волноводов нередко достаточно теории Хевисайда, и уравнения Максвелла не требуются.

Генератор отправляет волну в линию – это падающая волна, отражённая нагрузкой обратно в линию (если она есть), т.е. – «отражённая волна».

Если в линии есть две волны: прямая и отражённая, то, двигаясь навстречу друг другу, они порождают стоячую волну. Причём если, перемещаясь вдоль линии, будем измерять амплитудное (или среднеквадратичное) значение тока и напряжение в линии, то выявится, что точке максимума U соответствует точка минимума I , а точке минимума U – точка максимума I [9].

Как известно, в обычной цепи с частотой 50 Гц энергия может быть передана полностью в нагрузку, но при условии если нагрузка чисто активная, однако при реактивной нагрузке (ёмкости или индуктивности) энергия отражается обратно в сеть [10].

Аналогичная ситуация (близкая по физическому смыслу) имеет место в волноводе. С физической точки зрения цепь элементарных контуров в линии передаёт энергию от одного контура к другому и в результате в нагрузку, но поскольку каждый колебательный контур – это микросистема с уникальными свойствами, то данные элементарные контуры могут передать энергию либо таким же контурам (с LC равным или прямо пропорциональным LC элементам контуров), либо активному сопротивлению равному корню из отношения L к C . На рисунке 2 представлена схема замещения полуволновой линии электропередачи.

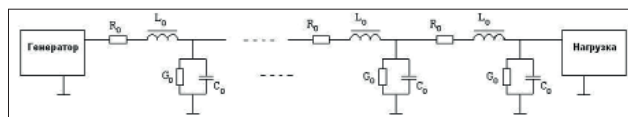


Рис. 2. Схема замещения полуволновой линии электропередачи

Fig. 2. Substitution diagram of a half-wave power transmission line

Корень из отношения L к C – волновое сопротивление (или импеданс) линии и измеряется в Ω max (в английской литературе – *characteristic impedance*). Распределение стоячих волн (если они имеются) зависит от длины, частоты и других параметров линии. Поскольку при передаче электрической энергии важен режим работы, позволяющий добиться стабильного напряжения в нагрузке при ее колебании в диапазоне 0-100%, то наиболее удобен режим, при котором точка (метраж конца линии) нагрузки совпала с точкой стоячей волны напряжения, которая имеет стабилизированный уровень напряжения при любой нагрузке [11].

Режим выбора подобной рабочей точки – ПВЛ-режим (полуволновой режим) – достигается при длине линии ЛЭП, равной (в общем случае кратной) длине полуволны генератора

$$\lambda/2 = c/(2f); \lambda/2 = L1,$$

где $L1$ – длина ПВЛ ЛЭП; c – скорость света; f – частота генератора.

Уменьшение потерь в полуволновой линии электропередачи осуществляется за счет следующего физического процесса: напряжение подается из генератора в линию, далее при движении к центру линии напряжение поднимается, достигая максимума в центре линии, ток при движении к центру падает, в центре линии напряжение максимальное, а ток минимальный. В конце линии напряжение падает и становится примерно равным напряжению на входе, а ток растёт и становится примерно равным току в начале линии. Причём входные и выходные параметры UIP неотличимы от таковых для такой же DC -линии, а за счет уменьшения тока в середине линии уменьшаются омические потери.

На *рисунке 3* представлена расчетная вольт-амперная характеристика полуволновой линии в 3 тыс. м с согласованной нагрузкой $R_{нагр} = Z_v = 818 \text{ Ohm}$ [9] и частотой 5000 Гц.

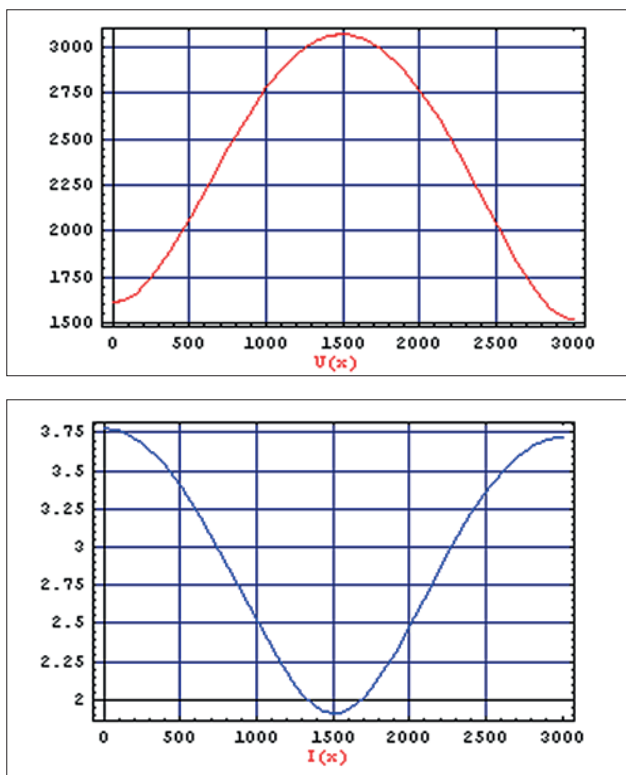


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика полуволновой линии длиной 3 тыс. м с согласованной нагрузкой $R_{нагр} = Z_v = 818 \text{ Ohm}$

Fig.3. Example of the volt-ampere characteristic of a 3000m half-wave line with a matched load $R_{load} = Z_v = 818 \text{ Ohm}$

Повышенная частота позволяет создавать более компактное электрооборудование полуволновой

передачи с минимальными массогабаритными размерами.

Магистральное расстояние полуволновой линии может быть любой длины (от 2 до 100 км), поскольку электрическая длина полуволновой линии зависит от частоты, а передающая частота благодаря современной электронной базе может быть произвольной (Naidoo P., Mbuere B., Kelesitse G. et al. The Western power corridor project – The Planning for large scale hydro electric power generation and transmission across Southern Africa. *IEEE PES Inaugural Africa Conference*. 2005. July).

Важная особенность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей – необходимость охвата сетями большой территории с малой плотностью нагрузки (5-15 кВт/км²). Это обуславливает значительные затраты на сооружение и реконструкцию распределительных сетей согласно ГОСТ 721-77 с номинальным междуфазным напряжением 0,4; 6 и 10 кВ, которые составляют 70% общих затрат для сельского электроснабжения. В связи с сокращением численности сельского населения и на фоне износа электрооборудования и электрических сетей возникает проблема выбора системы электроснабжения территорий с малой плотностью нагрузки [7].

Ежегодно растёт количество заявок на техническое присоединение потребителей к электрическим сетям, ряд которых находится от пунктов присоединения на расстоянии от 2 до 3 км. Потребителями могут быть жилые дома, фермерские хозяйства, магазины, водонапорные башни, пекарни, системы орошения, уличное освещение и ряд других предприятий, обслуживающих население, а также производственные потребители (животноводческие фермы, зерноочистительные пункты, теплицы, хранилища сельскохозяйственной продукции, мельницы и др.).

Развитию сельских электрических сетей способствует ряд постановлений Российской Федерации, в их числе: принятые программы Дальневосточный гектар и Мой гектар в Подмосковье. Данные земельные участки расположены в самых отдаленных районах, а владельцам этих гектаров необходимо электричество.

Вместе с тем проведение традиционной линии электропередачи на несколько десятков километров для потребителя в 15 кВт неэффективно, так как имеет ряд технических и экономических ограничений. Приобретение дизель-генератора может служить альтернативой, однако это сопряжено со значительными финансовыми расходами.

В связи с этим вопрос электроснабжения расположенных вдали хозяйств особенно важен и по-прежнему вызывает интерес.

Выводы. Применение полуволновых маломощных линий электропередачи позволит уменьшить потери электроэнергии при передаче по сравнению с традиционными способами. Несмотря на имеющиеся теоретические преимущества полуволновых линий электропередачи, они на данный момент не нашли применения в мировой электротехнике и требуют проведения дальнейших исследований. Перевод коротких линий электропередачи на полуволновые линии также потребует дополнительных исследований и разработки специфического оборудования, так как данные системы будут действовать на нестандартных частотах.

Тем не менее использование полуволновых маломощных линий электропередачи для электроснабжения вдали стоящих садоводческих товариществ, малых предприятий, коттеджей, фермерских хозяйств и др. в настоящее время является весьма актуальным и требует дальнейшего развития.

Библиографический список

1. Умбеткулов Е.К., Мурзаков Д.Н. Оценка влияния сечения проводов воздушной линии постоянного тока на потери энергии и капитальные затраты // *Современные научные исследования и инновации*. 2021. N4(120). EDN: CFVUAP.
2. Васильев В.А., Баринов В.А. Перспективы развития Тюменской энергосистемы // *Электрические станции*. 2001. N3. С. 2-11.
3. Бушуев В.В., Самородов Г.И., Путилова А.Т. Сверхдальние электропередачи полуволнового типа // *Известия РАН. Энергетика*. 1995. N6. С.84-91. EDN: PZXNXP.
4. Яворский В.В. Настройка линии нормальной частоты на полуволны большой мощности // *Электричество*. 1932. N11. С. 605-606.
5. Samorodov G., Kandakov S., Zilberman S., et al. Technical and economic comparison between direct current and half-wavelength transmission systems for very long distances. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. T. 11. N11. С. 2871-2878. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0024. EDN: XNJIXY.
6. Вершков В.А., Нахапетян К.Т., Ольшевский О.В. и др. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ ЕЭС Европейской части СССР // *Электричество. Энергия*. 1968. N8. С.10-16.
7. Кобылин А.В., Самородов Г.И., Зильберман С.М. и др. Промежуточный отбор мощности из полуволновой электропередачи // *Электричество*. 2015. N6. С. 4-11. EDN: TWVQXX.

8. Трубников В.З., Соколов А.В. Особенности функционирования нагруженных резонансных контуров в системах передачи электрической энергии // *Агротехника и энергообеспечение*. 2018. N4(21). С. 7-23. EDN: YVECAP.
9. Юферев Л.Ю., Рошин О.А., Александров Д.В. Математическое моделирование работы резонансной системы передачи электроэнергии // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70. N2(51). С. 37-41. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-37-41. EDN: MMWOC D.
10. Юферев Л.Ю. Особенности работы однопроводных электросетей повышенной частоты // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 14-19. DOI: 10.22314/207375992017.4.1419. EDN: ZEH DY L.
11. Рошин О.А., Юферев Л.Ю. Сравнительная эффективность заземления при передаче электроэнергии по однопроводным линиям на частоте 50 Гц и 8 кГц // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. N3(28). С. 111- 113. EDN: YLSZJJ.

References

1. Umbetkulov E.K., Murzakov D.N. Assessment of the Influence of the Cross-Section of DC Air Line Conductors on Energy Losses and Capital Costs. *Modern Scientific Research and Innovations*. 2021. N4(120) (In Russian). EDN: CFVUAP.
2. Vasilyev V.A., Barinov V.A. Prospects for the development of the tyumen power system. *Electric Stations*. 2001. N3. 2-11 (In Russian).
3. Bushuev V.V., Samorodov G.I., Putilova A.T. Ultra-Long-Range Semi-Wave Electric Transmission. *Bulletin of RAS. «Energetika»*. 1995. N6. 84-91 (In Russian). EDN: PZXNXP.
4. Yavorskiy V.V. Tuning the Normal Frequency Line to High-Power Half-Waves. *Electricity*. 1932. N11. 605-606.
5. Samorodov G., Kandakov S., Zilberman S., et al. Technical and economic comparison between direct current and half-wavelength transmission systems for very long distances. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. T. 11. N11. 2871-2878. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0024. EDN: XNJIXY.
6. Vershkov V.A., Nakapetyan K.T., Olshevsky O.V., et al. Complex tests of half-wave power transmission in the 500 kV grid of the European part of the USSR. *Electricity. Energy*. 1968. N8. 10-16.
7. Kobylin A.V., Samorodov G.I., Zilberman S.M. et al. Intermediate power selection from a half-wave power transmission. *Electricity*. 2015. N6. 4-11 (In Russian). EDN: TWVQXX.

8. Trubnikov V.Z., Sokolov A.V. Specificities of the functioning of the loaded resonance circuits in transmission systems of electrical energy systems. *Agrotechnics and Power Supply*. 2018. N4(21). 7-23 (In Russian). EDN: YVECAP.
9. Yuferev L.Yu., Roshchin O.A., Aleksandrov D.V. Mathematical modeling of resonant electric power transmission system. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023. Vol. 70. N2(51). 37-41 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-37-41. EDN: MMWOCD.
10. Yuferev L.Yu. Features of operation of single-wire high-frequency electrical grids. *Agricultural Machines and Technologies*. 2017. N4. 14-19 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.4.1419. EDN: ZEHDYL.
11. Roshchin O.A., Yuferev L.Yu. Comparative efficiency of grounding during power transmission via single-wire lines at 50 Hz and 8 kHz. *Innovations in Agriculture* 2018. N3(28). 111-113 (In Russian). EDN: YLSZJB.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Юфереv Л.Ю. – участие в подготовке и анализе литературных данных, критический анализ, доработка текста, формулирование общих выводов;

Рощин О.А. – сбор и анализ литературных данных по теме исследования, формулирование основных целей и задач исследования, подготовка материалов, подготовка текста, формулирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Yuferev L.Yu. – participation in the preparation and analysis of literature data, critical analysis, revision of the text, formulation of general conclusions;

Roshchin O.A. – collection and analysis of literature data on the research topic, formulation of the main goals and objectives of the research, preparation of materials, preparation of the text, formulation of general conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 01.04.2026

Статья принята к публикации 15.06.2026



Интеллектуальные системы управления микроклиматом для повышения энергоэффективности вертикальных ферм

Сергей Александрович Корольков^{1,2},

аспирант, ассистент, ya.rus88@bk.ru;

Оксана Александровна Липа¹,

кандидат технических наук, доцент

¹Российский государственный университет народного хозяйства имени В.И. Вернадского, г. Балашиха, Российская Федерация;

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Исследуется внедрение интеллектуальной системы управления на основе искусственного интеллекта для повышения энергоэффективности многоярусных гидропонных установок в условиях городского фермерства (сити-фермерства). Разработанная архитектура системы интегрирует блок сбора данных с датчиков (контроль температуры, влажности, pH, ЕС и освещенности), блок обработки на микроконтроллере (Raspberry Pi/ESP32), модуль принятия решений на основе алгоритмов машинного обучения (многослойные перцептроны, рекуррентные нейронные сети) и блок управления исполнительными механизмами (светодиодное освещение, насосы, вентиляторы). Уделили особое внимание оптимизации системы освещения за счет попарной установки ламп разного спектра (например, Quantum Board Samsung LM301B 5000K + красные светодиоды 660 нанометров и плазменные лампы), интенсивность и спектр которых динамически регулируются модулем искусственного интеллекта в зависимости от фазы роста растения. (Цель исследования) Повысить энергоэффективность сити-фермерства через интеграцию искусственного интеллекта в управление гидропонными установками и системами орошения растений. (Материалы и методы) Провели эксперимент на четырехъярусной проточной гидропонной установке (Nutrient Film Technique – NFT) общей площадью выращивания 3 квадратных метра в течение 30 суток. Рассмотрели культуру – салат, сорт Руккола. (Результаты и обсуждение) Выполнили сравнение эффективности управления с искусственным интеллектом и вручную. Проанализировали методы подбора искусственного освещения растений путем подбора ламп, измерения мощностей, расстояний между ними на одной плоскости, количества освещаемых зеленых растений, длительности работы и подбора циклов установки. (Выводы) Выявили снижение энергопотребления на 30 процентов (со 120 до 84 киловатт-час за цикл), увеличение урожайности на 25,6 процентов (с 8,2 до 10,3 килограммов) и существенную стабилизацию pH питательного раствора ($\pm 0,1$). Показали, что экономический эффект за один цикл выращивания составил около 846 рублей, что подтверждает высокий потенциал масштабирования решения. Констатировали эффективность интеграции искусственного интеллекта и адаптивного освещения для создания автономных, ресурсоэффективных городских агросистем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, двойное освещение, сити-ферма, энергоэффективность, автоматизация, нейросети, микроклимат.

Для цитирования: Корольков С.А., Липа О.А. Интеллектуальные системы управления микроклиматом для повышения энергоэффективности вертикальных ферм // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. № 2. С. 57-62. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-57-62. EDN: YEGTUN.

Scientific article

Intelligent Microclimate Management Systems for Enhancing Energy Efficiency in Vertical Farming

Sergey A. Korolkov^{1,2},

postgraduate, assistant, ya.rus88@bk.ru;

Oksana A. Lipa¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor

¹Vernadsky Russian State University of National Economy, Balashikha, Russian Federation;²Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. *The introduction of an intelligent control system based on artificial intelligence to improve the energy efficiency of multi-tiered hydroponic installations in urban farming (city farming) is being investigated. The developed system architecture integrates a sensor data acquisition unit (temperature, humidity, pH, EC and light monitoring), a microcontroller processing unit (Raspberry Pi/ESP32), a decision-making module based on machine learning algorithms (multilayer perceptrons, recurrent neural networks) and a control unit for actuators (LED lighting, pumps, fans). We paid special attention to optimizing the lighting system by installing lamps of different spectra in pairs (for example, Samsung LM301B 5000K Quantum Board + 660 nanometer red LEDs and plasma lamps), the intensity and spectrum of which are dynamically adjusted by the artificial intelligence module depending on the growth phase of the plant. (Research purpose) The research purpose is improving the energy efficiency of urban farming through the integration of artificial intelligence into the management of hydroponic plants and plant irrigation systems. (Materials and methods) Conducted an experiment on a four-tiered flow hydroponic installation (Nutrient Film Technique – NFT) with a total cultivation area of 3 square meters for 30 days. We examined the culture – lettuce, Arugula variety. (Results and discussion) We performed a comparison of management efficiency with artificial intelligence and manually. The methods of selecting artificial lighting for plants by selecting lamps, measuring capacities, distances between them on the same plane, the number of illuminated green plants, the duration of operation and the selection of installation cycles were analyzed. (Conclusions) A decrease in energy consumption by 30 percent (from 120 to 84 kilowatt-hours per cycle), an increase in yield by 25.6 percent (from 8.2 to 10.3 kilograms) and a significant stabilization of the pH of the nutrient solution (± 0.1) were revealed. It was shown that the economic effect for one growing cycle amounted to about 846 rubles, which confirms the high scaling potential of the solution. The effectiveness of the integration of artificial intelligence and adaptive lighting for the creation of autonomous, resource-efficient urban agricultural systems was stated.*

Keywords: *artificial intelligence, dual lighting, urban farming, energy efficiency, automation, neural networks, microclimate.*

For citation: Korolkov S.A., Lipa O.A. Intelligent microclimate management systems for enhancing energy efficiency in vertical farming. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 57-62 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-57-62. EDN: YEGTUN

Актуальность развития сити-фермерства, особенно в формате вертикальных ферм (*vertical farming*), связана с растущим дефицитом ресурсов и потенциалом локализации производства продовольствия, что подробно проанализировано в обзоре современных подходов [1-13].

С ростом плотности городского населения и ограниченностью сельхозугодий становится важным сити-фермерство – форма городского агропроизводства, основанная на замкнутых и контролируемых средах. Наиболее распространены гидропонные установки, чувствительные к параметрам микроклимата. Их регулирование в ручном или полуавтоматическом режиме требует значительных затрат энергии и труда. В этой связи целесообразно внедрение интеллектуальных

технологий управления, а также увеличение освещенности растений для более объемной продукции.

Искусственный интеллект (ИИ), благодаря своим возможностям в обработке больших объемов данных и быстром принятии решений, может улучшить управление гидропонными установками [1]. Системы на базе ИИ способны анализировать данные в реальном времени, предсказывать изменения в условиях окружающей среды и автоматически регулировать параметры, обеспечивая оптимальные условия для роста растений. Это не только повышает урожайность, но и снижает потребление энергии, что необходимо в условиях городского сити-фермерства [2].

Рассмотрено, как применение ИИ может способствовать повышению энергоэффективности гидро-

понных установок в контексте сити-фермерства, а также как повлияет качество освещения на результат выращенной продукции.

Настоящая работа направлена на изучение возможностей повышения энергоэффективности сити-фермерства с помощью ИИ и попарного метода подбора освещения для оптимизации управления гидропонными установками и системами орошения растений.

Цель исследования – повысить энергоэффективность сити-фермерства через интеграцию искусственного интеллекта в управление гидропонными установками и системами орошения растений.

Материалы и методы. ИИ-модули строятся на базе алгоритмов машинного обучения (нейросети, логика нечетких множеств) и используют входные данные от датчиков температуры, влажности, освещенности, *pH* и *ЕС* раствора. Выходные управляющие сигналы обеспечивают работу исполнительных механизмов: светодиодов, вентиляторов, насосов и дозаторов [3].

Пример применяемых алгоритмов:

- многослойные нейронные сети (*MLP*);
- рекуррентные сети (*RNN*) для прогнозирования климатических колебаний;
- градиентный бустинг для оптимизации параметров.

Структура интеллектуальной системы (рис. 1). Система состоит из:

- блока сбора данных (датчики);
- блока обработки (контроллер *Raspberry Pi*, *ESP32*);
- модуля принятия решений (ИИ);
- блока исполнительных механизмов;
- пользовательского интерфейса (веб-панель).

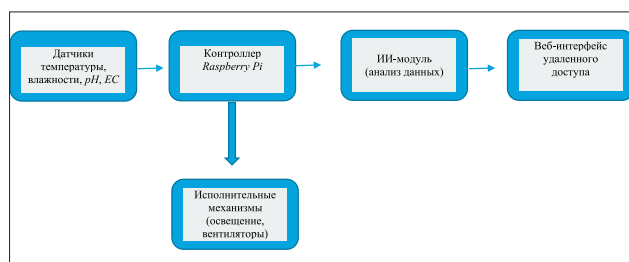


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы управления микроклиматом (датчики → микроконтроллер → нейросеть → исполнительные блоки)

Fig. 1. Architecture of an intelligent microclimate control system (sensors → microcontroller → neural network → actuators)

В качестве альтернативы указанных исполнительных компонентов возможно применение собственных разработок на базе зарубежной продукции с сохранением исходного качества работы оборудования.

Один из ключевых аспектов энергоэффективности гидропонных установок – система освещения. Поскольку большинство растений требуют определенного спектра света для фотосинтеза, выбор подходящего источника света становится критически важным (Корольков С.А., Липа О.А. К вопросу выбора контроллера для системы управления гидропонной установкой по выращиванию агрокультур в условиях «сити-фермерства» // Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации: материалы Международной научно-практической конференции. Балашиха. 2024. С. 132-137).

В качестве объекта исследования использовали четырехъярусную проточную гидропонную установку (*Nutrient Film Technique – NFT*) общей площадью выращивания 3 м². Выбор метода *NFT* обусловлен его высокой эффективностью в снабжении корневой системы кислородом и питательными веществами при минимальном расходе воды, что подтверждается исследованиями в области современных *plant factories*. Культура – салат (*Lactuca sativa*, сорт Руккола).

Внедрение систем управления освещением, основанных на ИИ и попарно установленных ламп разного спектра, дополнительно улучшит ситуацию, позволяя адаптировать интенсивность и спектр света к текущим условиям, что в свою очередь приводит к снижению затрат на электроэнергию и увеличению продукции.

Поскольку свет состоит из разных волн, растениями потребляются только определенные из них. Рассмотрели влияние длины волн на рост и здоровье зеленных культур [4]:

- меньше 280 нм – короткий ультрафиолет, губительный эффект для любых растений;
- 315-380 нм – длинный ультрафиолет, позиция, необходимая для обмена веществ, а также роста растений. Задержит вытягивание стебля, но при этом повысит содержание витаминов;
- 380-490 нм – фиолетовые и синие, данная волна идеально поглощается хлорофиллом, что создает прекрасные условия для интенсивности фотосинтеза;
- 490-600 нм – зеленые и желтые, не оказывают влияние на рост и развитие;
- 600-780 нм – красные и оранжевые волны, служат основным видом энергии для создания фотосинтеза;
- 780-1100 нм – ближний инфракрасный, волны хороши для создания фотосинтеза. В некоторых случаях они полезны для здоровья растений;
- свыше 1100 нм – дальний инфракрасный, перегрев и, как следствие, гибель растения (Гололобов В.Н. *RaspberryPi* для любознательных. Просто о сложном. Нижний Новгород: НиТ. 2019. 240 с.).

Указанные показатели отображают потребности растений и таким образом благодаря им можно понять, как действует каждый участок спектра света на культивирование растений. Исходя из показателей на сегодняшний день существует большое количество фитоламп, которые имеют оптимальную мощность и служат приоритетными лампами для выращивания в гидропонике [5].

Рассмотрели на собственном примере возможные варианты подходящих ламп для парной установки в гидропонную систему.

Мощность, модель – оптимальное расстояние до цветка – площадь – дистанция между лампами – количество охватываемых растений:

- 90 Вт, LED – 15-30 см – 2 м² – 1,2 × 1,2 – 1-2;
- 260 Вт, LED – 30-60 см – 2,3 м² – 1,5 × 1,5 – 2-5;
- 50 Вт, PLASMA – 10-30 – 1,5 м² – 1 × 1 – 1;
- 200 Вт, PLASMA – 30-60 см – 2,6 м² – 1,7 × 1,7 – до 7;
- 300 Вт, PLASMA – 50-90 см – 5,8 м² – 2,4 × 2,4 – до 10;
- 90 Вт, LED – 10 см – 0,3 м² – 0,5 × 0,5 – 1;
- 260 Вт, LED – 12-33 см – 0,8 м² – 0,9 × 0,9 – 4;
- 50 Вт, PLASMA – 10 см – 0,3 м² – 0,5 × 0,5 – 1 [6].

Результаты и обсуждение. В ходе исследования в Царскосельском аграрно-технологическом колледже в лаборатории «Сити-фермерство» выполнили сравнение эффективности управления с ИИ и вручную, а также проанализировали методы выбора искусственного освещения растений путем подбора ламп, измерения мощностей, расстояний между ними на одной плоскости, количества освещаемых зеленых растений, длительности работы и подбора циклов установки [7].

Объект: четырехъярусная гидропонная установка (3 м²), культура – салат (Руккола).

Метод: попарное сравнение при прочих равных условиях в течение 30 суток (таблица, рис. 2).

Как видно из таблицы и рисунка 2, расчет за 30 дней показывает:

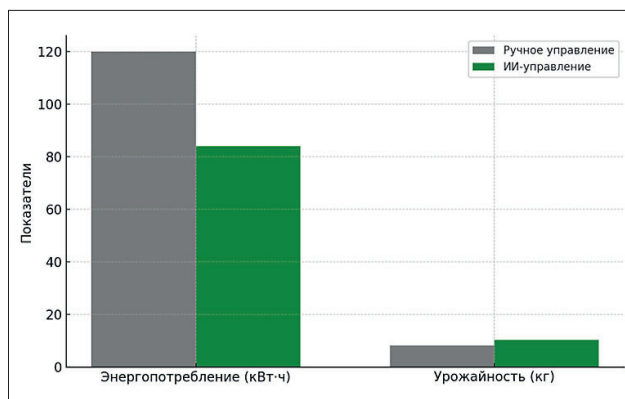


Рис. 2. Сравнительная диаграмма энергопотребления и урожайности

Fig. 2. Comparative chart of energy consumption and crop yield

- экономия электроэнергии на 36 кВт·ч × 6 руб/кВт·ч = 216 руб/цикл;
- прирост урожайности: 2,1 кг × 300 руб/кг = 630 руб/цикл;
- совокупная экономия: ~846 руб/цикл;
- годовая выгода для 10 установок (12 циклов): ~101 520 руб.

Показатели значительные, ИИ-подход обеспечивает стабильность pH, снижение колебаний микроклимата, автоматическое управление в ночные часы и удаленный контроль. Отмечено снижение ошибок, связанных с человеческим фактором [8].

Экономия энергии 30% при ИИ-управлении (таблица) достигнута не только за счет оптимизации циклов работы, но и благодаря использованию энергоэффективных светодиодных (LED) источников света с подобранным спектром. LED-лампы, в отличие от традиционных решений, позволяют целенаправленно излучать волны, необходимые для фотосинтеза (синий и красный диапазоны), минимизируя затраты на неиспользуемые части спектра, что напрямую ведет к снижению энергопотребления без ущерба для фотосинтетической фотонной плотности (PPFD) [12].

Сравнительные характеристики управления энергопотреблением Comparative characteristics of energy management		
Показатель	Ручное управление	ИИ-управление
Энергопотребление, кВт·ч	120	84
Урожайность, кг	8,2	10,3
Отклонение pH	±0,5	±0,1
Режимы работы	Ручное переключение	Автоматическое переключение
Необходимость контроля параметров	Необходимо до 4 раз/мес.	Необходимо не более 1 раз/мес.
Примечание: pH – уровень ионов водорода в почве (растворе); кВт·ч – киловатт-час – единица измерения электрической энергии; кг – единица измерения массы.		

Экономическая эффективность выше с применением ИИ. Примеры и расчеты демонстрируют, что общая стоимость установки, состоящей из четырех ярусов, с учетом модернизации попарного освещения составляет до 50 тыс. руб., что в свою очередь окупит проект за считанные месяцы. Эффективность выше при выращивании ягод, таких как голубика, или при выращивании хищных растений, хотя они и не овощные или ягодные культуры АПК, но данная установка способна вырастить отмеченный вид растений, а это означает, что срок окупаемости снизится в десятки раз за счет высокого спроса на продукцию на рынке [9].

Выводы. Интеграция ИИ в управление микроклиматом гидропонных установок сити-фермерства обеспечивает комплексное повышение энергоэффективности, урожайности и автономности систем. Дальнейшие исследования будут направлены на масштабирование решения и интеграцию с предиктивными IoT-моделями. Также в результате многочисленных испытаний по подбору спектра освещения использовали два типа светодиодных ламп на каждую полку для растений:

- *Quantum board Samsung lm301b* 5000K + SSL 660 нм, 60 Вт. Обеспечивает ИК-освещением в зависимости от фазы роста и установки параметров освещения. Предпочтительная фаза «Проращивание» зеленных культур [10];

- 50 Вт, *PLASMA* – 10-30 – 1,5 м² – 1 × 1 – 1. Обеспечивает дополнительным спектром дневного освещения. Предпочтительно совместно с *Quantum board Samsung* для фазы роста овощных культур и в одиночном варианте для зеленных культур той же фазы.

Длительность освещения выставляется параметрами ИИ в зависимости от типа растения и фазы его роста, но в большинстве уделено более 10 ч освещения в сутки.

LED-лампы обеспечивают нужный спектр света, регулировку интенсивности освещения, экономию электроэнергии, длительный срок службы, более качественную освещенность и отсутствие пульсации света [11].

Продолжается развитие направления «сити-фермерство» не только в рамках АПК, но и в городских сферах с использованием озеленения крыш многоэтажек, макетирования «живых стен» с системами орошения корней и имитацией погодных осадков, что мало применяется еще в разработках данной сферы, а также в рамках проведения демонстрационных экзаменов в учебных заведениях с целью добиться идеального условия выращивания растений и создания собственного микроклимата [12].

Полученные результаты по повышению урожайности и энергоэффективности полностью соответствуют основному вектору развития сити-фермерства, направленному на формирование замкнутых, управляемых и рентабельных агросистем, как это определено в ключевых обзорных работах по данной теме [13]. Дальнейшие исследования планируется направить на масштабирование решения.

Библиографический список / References

1. Benke K., Tomkins B. Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*. 2017. Vol. 13. Iss. 1. 13-26. DOI: 10.1080/15487733.2017.1394054.
2. Shamshiri R.R., Kalantari F., Ting K.C. et al. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11. Iss. 1. 1-22. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210.
3. Liakos K.G., Busato P., Moshou D. et al. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*. 2018. Vol. 18. Iss. 8. 2674. DOI: 10.3390/s18082674.
4. McCree K.J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*. 1972. Vol. 9. 191-216. DOI: 10.1016/0002-1571(71)90022-7.
5. Darko E., Heydarizadeh P., Schoefs B. et al. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014. Vol. 369. Iss. 1640. 20130243. DOI: 10.1098/rstb.2013.0243.
6. Yeh N., Chung J.-P. High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. Iss. 8. 2175-2180. DOI: 10.1016/j.rser.2009.01.027.
7. Beacham A.M., Vickers L.H., Monaghan J.M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 94. Iss. 3. 277-283. DOI: 10.1080/14620316.2019.1574214.
8. Sharma N., Acharya S., Kumar K. et al. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2018. Vol. 17. Iss. 4. 364. DOI: 10.5958/2455-7145.2018.00056.5
9. Pennisi G., Orsini F., Blasioli S. et al. Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting.

- Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Iss. 1. DOI: 10.1038/s41598-019-50783-z.
10. Hernández R., Kubota C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*. 2016. Vol. 121. 66-74. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.04.001.
 11. Goto E. Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. *Acta Horticulturae*. 2012. Vol. 956. 37-49. DOI: 10.17660/ActaHortic.2012.956.2.
 12. Yeh N., Chung J.-P. High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. Iss. 8. 2175-2180. DOI: 10.1016/j.rser.2009.01.027.
 13. Beacham A.M., Vickers L.H., Monaghan J.M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 94. Iss. 3. 277-283. DOI: 10.1080/14620316.2019.1574214.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 03.12.2025

Статья принята к публикации 24.02.2026



Вероятностно-статистическая модель оценки ресурса кожухотрубных теплообменных аппаратов

Владимир Андреевич Буторин,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: butorin_chgau@list.ru;
Игорь Борисович Царев,
кандидат технических наук, доцент;
Марина Викторовна Андреева,
соискатель

Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Челябинская область, Российская Федерация

Реферат. Теплообменные аппараты играют важную роль в различных технологиях сельскохозяйственного производства. Их долговечность служит одним из ключевых факторов, определяющих надежность оборудования. (Цель исследования) Разработать вероятностно-статистическую модель надежности кожухотрубных теплообменных аппаратов для использования в сельскохозяйственном производстве. (Материалы и методы) Учили особенности функционирования работы теплообменника в двух режимах: эксплуатационном, когда теплообменный аппарат используется по прямому назначению, и стояночном, при котором его применение не предусмотрено. Показали, что суммарная наработка теплообменника до отказа обусловлена предельным значением коррозионного износа, скоростей коррозии, а также константой, характеризующей режимы работы теплообменника. Приняли во внимание при получении плотности распределения ресурса теплообменного аппарата, что скорости коррозии – случайные величины с нормальной плотностью распределения. (Результаты и обсуждение) Установили исходные данные для определения плотности распределения ресурса теплообменника на разработанном стенде, к ним относятся: математическое ожидание скорости коррозии в случае применения по назначению $m_1 = 0,0144$ микрометров в час, математическое ожидание скорости коррозии в стояночном режиме $m_2 = 0,0300$ микрометров в час, среднеквадратическое отклонение скорости коррозии в случае применения по назначению $\sigma_1 = 0,0043$ микрометров в час, среднеквадратическое отклонение скорости коррозии в стояночном режиме $\sigma_2 = 0,0097$ микрометров в час. Определили, что коррозионный износ не должен превышать 1,5 миллиметра. Приняли коэффициент, характеризующий режим эксплуатации теплообменника, равным $k = 23$. Представили реализацию плотности распределения ресурса теплообменного аппарата и его параметры: математическое ожидание $m_T = 51,4$ тысячи часов и среднеквадратическое отклонение $\sigma_T = 19,6$ тысяч часов. Привели некоторые значения гамма-процентного ресурса. (Выводы) Разработали вероятностно-статистическую математическую модель, которая позволяет прогнозировать ресурс теплообменного аппарата в его вероятностном аспекте.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, вероятностно-статистическая модель, режим работы, долговечность.

Для цитирования: Буторин В.А., Царев И.Б., Андреева М.В. Вероятностно-статистическая модель оценки ресурса кожухотрубных теплообменных аппаратов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 63-68. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-63-68. EDN: PYPYZJ.

Scientific article

Probabilistic and Statistical Model for Estimating the Resource of Shell-and-Tube Heat Exchangers

Vladimir A. Butorin,
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: butorin_chgau@list.ru;
Igor B. Tsarev,
Ph.D.(Eng.), associate professor;
Marina V. Andreeva,
applicant

South Ural State Agrarian University, Troitsk, Chelyabinsk region, Russian Federation

Abstract. Heat exchangers play an important role in various agricultural production technologies. Their durability is one of the key factors determining the reliability of the equipment. (Research purpose) The research purpose is developing a probabilistic-statistical model of reliability of shell-tube heat exchangers for use in agricultural production. (Materials and methods) The features of the functioning of the heat exchanger in two modes were taken into account: operational, when the heat exchanger is used for its intended purpose, and stand-by, in which its use is not provided. It was shown that the total hours to failure of the heat exchanger is due to the limiting values of corrosion wear, corrosion rates, as well as the constant characterizing the modes of operation of the heat exchanger. It was taken into account in obtaining the resource density of the heat exchanger that corrosion rates are random values with a normal distribution density. (Results and discussion) The initial data were established to determine the density of the distribution of the heat exchanger resource on the developed stand, these include: the mathematical expectation of the corrosion rate in the case of application for the purpose $m_1 = 0.0144$ micrometers per hour, the mathematical expectation of the corrosion rate in the stand-by mode $m_2 = 0.0300$ micrometers per hour, the average square deviation of the corrosion rate in the case of application for the purpose $\sigma_1 = 0.0043$ micrometers per hour, the average square deviation of the corrosion rate in the stand-by mode $\sigma_2 = 0.0097$ micrometers per hour. It was determined that corrosion wear should not exceed 1.5 millimeters. The ratio characterizing the operating mode of the heat exchanger is $k = 23$. Presented the realization of the resource density of the heat exchanger and its parameters: the mathematical expectation $m_T = 51.4$ thousand hours and the standard deviation $\sigma_T = 19.6$ thousand hours. Some gamma-percentage resource values were given. (Conclusions) We have developed a probability-statistical mathematical model that allows us to predict the life of a heat exchanger in its probabilistic aspect.

Keywords: heat exchanger, probabilistic-statistical model, operating mode, durability.

For citation: Butorin V.A., Tsarev I.B., Andreeva M.V. Probabilistic and statistical model for estimating the resource of shell-and-tube heat exchangers. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 63-68 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-63-68.EDN: PYPYZJ.

В сельском хозяйстве применяются разнообразные теплообменники. Среди них выделяются кожухотрубные с прямыми и спиральными трубами, пластинчатые, спиральные теплообменные аппараты (ТА) (Булыгин Ю.А., Апасов В.Н. Расчет и проектирование теплообменного аппарата: учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный технический университет. 2006. 136 с.) [1, 2]. Кожухотрубные теплообменные аппараты получили широкое распространение благодаря простоте конструкции и удобству в эксплуатации [3-5]. Они могут быть использованы, как устройства для получения горячего водоснабжения, при подключении в систему теплоснабжения. Надежность служит основным параметром при

оценке качества теплообменников, а ресурс, в свою очередь, – основным критерием надежности [6-8].

Коррозия элементов систем отопления и водоснабжения – главная причина их отказов. Она создает 25-90% аварийных ситуаций в этих системах [9, 10]. Агрессивность среды, с которой контактирует металл, больше всего влияет на скорость его коррозии [10, 11].

Цель исследования – разработать вероятностно-статистическую модель надежности кожухотрубных теплообменных аппаратов для использования в сельскохозяйственном производстве.

Материалы и методы. При разработке вероятностно-статистической математической модели для разработанного теплообменника (рис. 1) учли его

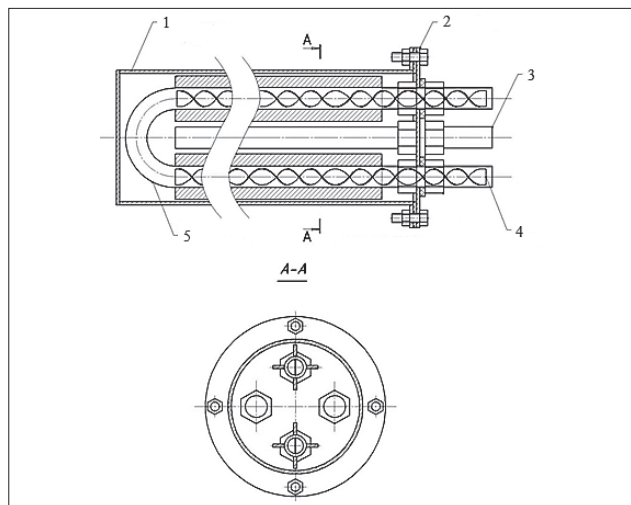


Рис. 1. Конструкция теплообменного аппарата: 1 – наружная труба; 2 – фланец; 3 – входной патрубок нагреваемого теплоносителя; 4 – турбулизатор потока греющего теплоносителя; 5 – внутренняя труба

Fig. 1. The design of the heat exchanger: 1 – external pipe; 2 – flange; 3 – inlet pipe of the heated coolant; 4 – turbulizator of the heating coolant; 5 – internal pipe

особенности функционирования в двух режимах (патент № 2558485 Российская Федерация, МПК F28D7/02. Теплообменник / Г.А. Круглов, М.В. Андреева; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный аграрный университет; заявл. № 2014126049/06 от 26.06.2014; опубл. 10.08.2015. Бюлл. № 22. 6 с.). Первый режим – рабочий, когда аппарат используется по прямому назначению. Второй режим – стояночный, при котором его применение не предусмотрено.

В разных режимах работы ТА процесс коррозии будет идти с различной интенсивностью.

Суммарная наработка теплообменника до отказа зависит от скорости коррозии теплообменника в случае применения по назначению V_1 , мкм/ч, скорости коррозии в стояночном режиме V_2 , мкм/ч, от предельного значения коррозионного износа H , мм, а также константы k [11]:

$$T = \frac{H(k+1)}{V_1 + kV_2}. \quad (1)$$

Скорость коррозии зависит от неконтролируемых факторов, имеющих случайный характер, в предварительных исследованиях установлено, что скорости V_1 и V_2 – случайные величины с нормальной плотностью распределения.

Если V_1 и V_2 – случайные величины с нормальной плотностью распределения, то линейная комбинация случайных величин также случайная величина, распределенная по нормальному закону. Поэтому выражение (1) можно представить в виде:

$$T = \frac{H(k+1)}{V}, \quad (2)$$

где $V = V_1 + kV_2$ – случайная величина с нормальной плотностью распределения $f(v)$, математическим ожиданием m и среднеквадратическим отклонением σ , равными (Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 10-е изд., стер. М.: Academia. 2005. 576 с.):

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(v-m)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad (3)$$

$$m = m_1 + km_2; \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + k^2\sigma_2^2}. \quad (5)$$

В выражении (4) m_1 и m_2 – математические ожидания скоростей коррозии V_1 и V_2 соответственно; в выражении (5) σ_1 и σ_2 – среднеквадратические отклонения скоростей коррозии V_1 и V_2 соответственно.

Константа k , характеризующая режимы работы теплообменника, определяется отношением времени нахождения теплообменника в стояночном режиме T_2 в течение суток к времени работы теплообменника в режиме по назначению T_1 в течение суток:

$$k = T_2/T_1. \quad (6)$$

Согласно выражению (2), ресурс теплообменника T носит случайное значение, так как зависит от случайной величины V . Плотность распределения ресурса $g(t)$ определяется по формуле (Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 10-е изд., стер. М.: Academia. 2005. 576 с.):

$$g(t) = f[\psi(t)] \cdot \left| \frac{d\psi(t)}{dt} \right|, \quad (7)$$

где $\psi(t)$ – функция, обратная по отношению к функциональной зависимости (2).

Зависимость, обратная выражению (2), имеет вид:

$$\psi(t) = \frac{H(k+1)}{t}, \quad (8)$$

а ее производная равна:

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = -\frac{H(k+1)}{t^2}. \quad (9)$$

Подставляя в формулу (3) вместо v выражение (8) для $\psi(t)$, а также выражения (4), (5) и (9), получим плотность распределения ресурса теплообменника $g(t)$ в развернутом виде:

$$g(t) = \frac{H(k+1)}{t^2 \sqrt{2\pi(\sigma_1^2 + k^2\sigma_2^2)}} \exp\left\{-\frac{[H(k+1) - t(m_1 + km_2)]^2}{2t^2(\sigma_1^2 + k^2\sigma_2^2)}\right\}. \quad (10)$$

Плотность распределения ресурса (10) несет в себе исчерпывающую информацию об этой случайной величине и позволяет рассчитать все ее вероятностные характеристики, такие как математическое ожидание m_T , среднеквадратическое отклонение σ_T и зависимость вероятности безотказной работы от

наработки $P(t)$ (Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 10-е изд., стер. М.: Academia. 2005. 576 с.):

$$m_T = \int_0^{\infty} t g(t) dt; \quad (11)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^{\infty} t^2 g(t) dt - m_T^2}; \quad (12)$$

$$P(t) = \int_t^{\infty} g(t) dt. \quad (13)$$

Реализацию разработанной вероятностно-статистической модели ТА целесообразно осуществлять по следующей методике:

- установить основные факторы, влияющие на скорость коррозии ТА;

- получить законы распределения основных, влияющих на скорость коррозии факторов, и уровни их варьирования для возможности использования активного планирования эксперимента;

- провести испытания на основе многофакторного планирования эксперимента и установить уравнения регрессии скорости коррозионного износа от основных воздействующих факторов;

- на основе разработанной вероятностно-статистической модели определить плотность распределения ресурса, обеспечивающую возможность его оценки для любой вероятности безотказной работы исследуемого ТА.

Результаты и обсуждение. По результатам предварительных исследований на специально разработанном стенде (рис. 2) получили оценку параметров, входящих в выражение плотности распределения ресурса (10): $m_1 = 0,0144$ мкм/ч, $m_2 = 0,0300$ мкм/ч, $\sigma_1 = 0,0043$ мкм/ч, $\sigma_2 = 0,0097$ мкм/ч. Коррозионный износ не должен превышать 50% значения толщины стенки новой трубы, в связи с этим для трубы, толщина стенки которой равна 3 мм, предельное состояние $H = 1,5$ мм (ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Российский институт стандартизации. 2024).

По данным эксплуатационных наблюдений коэффициент, характеризующий режим работы теплообменника, равен $k = 23$.

На основании этих данных средствами *Mathcad* построили график плотности распределения ресурса ТА (рис. 3) и рассчитали его математическое ожидание $m_T = 51,4$ тыс. ч и среднее квадратическое отклонение $\sigma_T = 19,6$ тыс. ч.

Зависимость вероятности безотказной работы ТА от наработки $P(t)$ построили с использованием выражения (13) (рис. 4).

Из графика на рисунке 4 методом трассировки в *Mathcad* может быть найден любой гамма-процент-

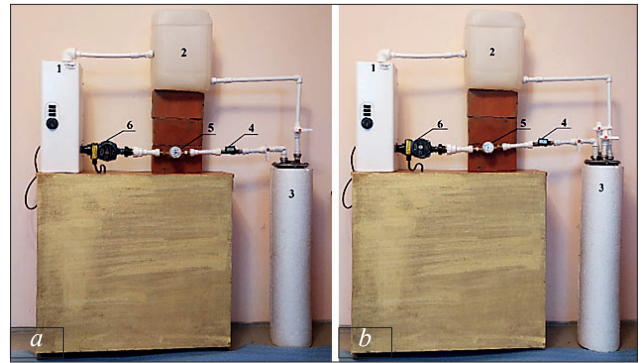


Рис. 2. Стенд для определения скоростей коррозии: *a* – режим применения по назначению; *b* – стояночный режим; 1 – котел; 2 – бак; 3 – теплообменный аппарат; 4 – датчик температуры; 5 – расходомер воды; 6 – насос циркуляционный

Fig. 2. Stand for determining corrosion rates: *a* – application mode for its intended purpose; *b* – stand-by mode; 1 – boiler; 2 – tank; 3 – heat exchanger; 4 – temperature sensor; 5 – water flowmeter; 6 – circulation pump

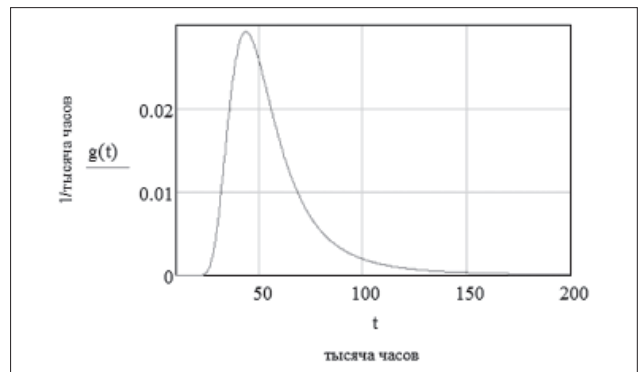


Рис. 3. Плотность распределения ресурса теплообменника

Fig. 3. Distribution of the heat exchanger resource

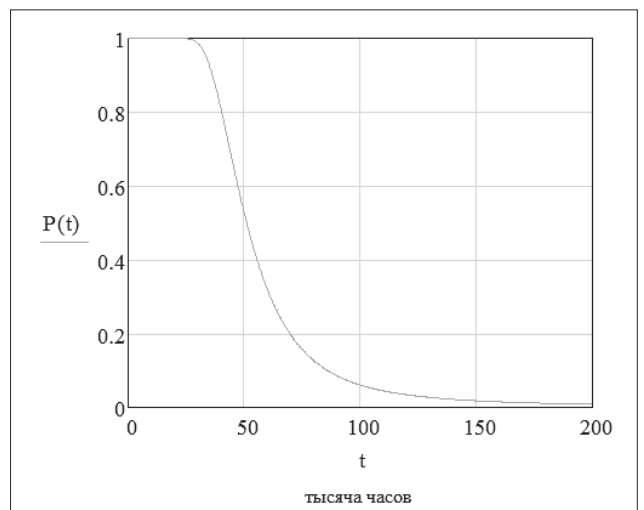


Рис. 4. Зависимость вероятности безотказной работы теплообменника от наработки

Fig. 4. Probability of failure-free operation of the heat exchanger on working time

Table		Таблица						
Вероятность безотказной работы теплообменного аппарата The probability of failure-free operation of the heat exchanger								
$P(t)$	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,99
T_7 , тыс. ч	185	85,9	69,6	55,5	47,3	40,3	36,3	29,3

ный ресурс T_7 , то есть наработка, в течение которой с вероятностью γ износ стенки трубы теплообменника не достигнет предельно допустимой величины. Некоторые значения вероятности безотказной работы теплообменного аппарата приведены в *таблице*.

Выводы. Разработали вероятностно-статистическую модель оценки ресурса теплообменного аппарата. Апробацию данной модели провели путем испытаний на разработанном стенде с использованием теории многофакторного планирования. В результате испытаний получили уравнения регрессии скорости коррозионного износа в зависимости от эксплуатационных факторов. На основании полученной полиномиальной зависимости установили параметры разработанной модели, которые имеют следующие значения: $m_1 = 0,0144$ мкм/ч, $m_2 = 0,0300$ мкм/ч, $\sigma_1 = 0,0043$ мкм/ч, $\sigma_2 = 0,0097$ мкм/ч соответственно для работы ТА в режиме применения по назначению и стояночном режиме. Полученная в результате исследований плотность распределения ресурса ТА позволила определить его средний ресурс вследствие коррозионного износа, составляющий 51,4 тыс. ч, что при ежедневном использовании составит 5,8 лет, а при использовании только в отопительный период 10 лет.

Зависимость вероятности безотказной работы теплообменника от наработки дает возможность установить, с какой вероятностью коррозионный износ не достигнет своего предельного значения.

Библиографический список

1. Ганижева Л.Л., Жлобо Р.А., Степанова Е.Г. и др. Теплообменники в сахарной промышленности // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2024. N3. С. 232-239. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-3-232-239. EDN: EAGNFD.
2. Чадов А.Ю., Зольников А.С., Вяхирев К.А. Современные теплообменные аппараты, применяемые в промышленности // *Вопросы устойчивого развития общества*. 2022. N2. С. 273-277. EDN: EPIYVN.
3. Куцев Л.А., Мелькумов В.Н., Крюков И.В. и др. Моделирование механизма теплообмена в кожухотрубном змеевиковом теплообменнике // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2024. N1(73). С. 24-33. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.73.1.002. EDN: JWPCYI.
4. Панфилов И.А. Исследование теплообмена в кожухотрубных теплообменниках с применением запасенного хладагента // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2024. Т. 13. N2(66). С. 181-188. EDN: DWKGGU.
5. Плотников П.Н., Бродов Ю.М., Купцов В.К. и др. Надежность теплообменных аппаратов паротурбинных установок с учетом технологических и эксплуатационных факторов // *Тяжелое машиностроение*. 2002. N2. С. 38-40.
6. Буторин В.А., Гусейнов Р.Т., Царев И.Б. Моделирование влияния примесей песка в скважинной воде на ресурс упорного подшипника погружного электродвигателя // *АПК России*. 2023. Т. 30. N2. С. 214-217. DOI: 10.55934/10.55934/2587-8824-2023-30-2-214-217. EDN: OWBEQZ.
7. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Волчков Ю.Д. и др. Определение современных показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25. N2. С. 58-70. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-58-70. EDN: QNYMLE.
8. Тоиров И.Ж. Стендовые и эксплуатационные испытания подшипников качения на долговечность // *Проблемы современной науки и образования*. 2025. N6(205). С. 12-15. EDN: ZIRZZW.
9. Моисеева Л.С., Углова Е.С. Автоматизированная вычислительная система поддержки принятия решений в задачах коррозионной защиты «Барьер-СО₂» // *Нефтяное хозяйство*. 2009. N10. С. 112-113. EDN: KYCRUL.
10. Углова Е.С., Моисеева Л.С. Установление причин коррозии технологического участка в системе поддержания пластового давления нефтяного месторождения // *Коррозия: материалы, защита*. 2009. N10. С. 20-25. EDN: KZFDSN.
11. Саплин Л.А., Буторин В.А., Андреева М.В. Оценка интенсивности коррозионного износа теплообменных аппаратов // *АПК России*. 2025. Т. 32. N5. С. 685-690. DOI: 10.55934/2587-8824-2025-32-4-6855-690. EDN: QPXUTU.

References

1. Ganizheva L.L., Zhlobo R.A., Stepanova E.G. et al. Heat exchangers in the sugar industry. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex-healthy food products*. 2024. N3. 232-239 (In Russian). DOI: 10.24412/2311-6447-2024-3-232-239. EDN: EAGNFD.
2. Chadov A.Y., Zolnikov A.S., Vyakhirev K.A. Modern Heat Exchangers Used in Industry. *Issues of Sustainable Development of Society*. 2022. N2. 273-277 (In Russian). EDN: EPIYVN.
3. Kushchev L.A., Melkumov V.N., Kryukov I.V. et al. Simulation of a heat transfer mechanism in a shell and tube coil heat exchanger. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2024. N1(73). 24-33 (In Russian). DOI: 10.36622/2541-7592.2024.73.1.002. EDN: JWPCYI.
4. Panfilov I.A. Study of heat transfer in shell-and-tube heat exchangers using stored refrigerant. *XXI century: Results of the Past and Problems of the Present plus*. 2024. Vol. 13. N2(66). 181-188 (In Russian). EDN: DWKGGU.
5. Plotnikov P.N., Brodov Y.M., Kuptsov V.K. et al. Reliability of heat exchangers of steam turbine installations taking into account technological and operational factors. *Russian Journal of Heavy Engineering*. 2002. N2. 38-40 (In Russian).
6. Butorin V.A., Guseinov R.T., Tsarev I.B. Modeling the effect of sand impurities in well water on the resource of the thrust bearing of the submersible electric motor. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2023. Vol. 30. N2. 214-217 (In Russian). DOI: 10.55934/10.55934/2587-8824-2023-30-2-214-217. EDN: OWBEQZ.
7. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Volchikov Yu.D. et al. Determination of modern reliability indicators of relay protection and automation devices. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023. Vol. 25. N2. 58-70 (In Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-58-70. EDN: QNYMLE.
8. Toirov I.Zh. Bench and operational testing of rolling bearings for durability. *Problems of Modern Science and Education*. 2025. N6(205). 12-15 (In Russian). EDN: ZIRZZW.
9. Moiseeva L.S., Uglova E.S. Automated computing system and support of decision-making in problems of corrosion protection «barrier-CO₂». *Oil Industry*. 2009. N10. 112-113 (In Russian). EDN: KYCRUL.
10. Uglova E.S., Moiseeva L.S. Identification of the Causes of Corrosion of the Technological Site in the System Maintaining Reservoir Pressure of an Oil Field. *Corrosion: Materials, Protection*. 2009. N10. 20-25 (In Russian). EDN: KZFDSN.
11. Saplin L.A., Butorin V.A., Andreeva M.V. Assessment of the intensity of corrosive wear of heat exchangers. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2025. Vol. 32. N5. 685-690 (In Russian). DOI: 10.55934/2587-8824-2025-32-4-6855-690. EDN: QPXUTU.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 03.04.2026

Статья принята к публикации 27.05.2026



Цифровые решения для управления молочными фермами: сравнительный анализ современных российских систем

Виктор Владимирович Рыкунов,
ассистент, e-mail: RykunovVV@mpei.ru;

Николай Ильич Гребенщиков,
старший преподаватель;

Дмитрий Александрович Шестов,
кандидат технических наук, старший преподаватель

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация

Реферат. Рассматриваются современные российские цифровые решения для управления молочными фермами и их соответствие глобальным тенденциям. Акцентируется внимание на значимости молочного животноводства для российского агропромышленного комплекса, а также на проблемах традиционных методов управления и преимуществах цифровизации, поддерживаемой государственными программами. (Цель исследования) Провести сравнительный анализ современных российских систем управления молочными фермами (Musoft, АРКА, М-Complex, «МОЛОКО 2.0», «Умная ферма 4.0») для определения их функциональных возможностей, уровня автоматизации и применимости для хозяйств различного масштаба, а также сравнить с глобальными аналогами для оценки конкурентоспособности. (Материалы и методы) Выполнили анализ описаний систем, научных публикаций и открытых источников о мировых платформах (Afimilk, DeLaval DelPro, VAS DairyComp 305, UNIFORM-Agri, GEA DairyNet Herd, MilkingCloud, AgriWebb). (Результаты и обсуждение) Привели обзор каждой российской системы: Musoft – универсальна для любого масштаба, но не интегрирована с роботами; АРКА – использует искусственный интеллект для мониторинга здоровья и рисков, ориентирована на средние и крупные фермы; М-Complex – модульная, с акцентом на планирование и управление ресурсами; «МОЛОКО 2.0» – облачная система с удобным вводом данных и функцией генеалогии; «Умная ферма 4.0» – интегрирована с роботизированными доильными установками, подходит для небольших автоматизированных ферм. Установили, что сравнение с международными системами выявляет их превосходство в области интернета вещей и автоматизации (например, DeLaval DelPro и Afimilk), однако российские системы выделяются доступностью и адаптацией к местным условиям. (Выводы) Показали, что российские системы конкурентоспособны для малых ферм, но нуждаются в модернизации с целью соответствия глобальным стандартам. Рекомендовали выбирать систему, исходя из масштаба и ресурсов конкретного хозяйства.

Ключевые слова: цифровизация сельского хозяйства, управление молочными фермами, сравнительный анализ, ИИ в животноводстве, роботизированное оборудование, российские системы управления, глобальные аналоги.

Для цитирования: Рыкунов В.В., Гребенщиков Н.И., Шестов Д.А. Цифровые решения для управления молочными фермами: сравнительный анализ современных российских систем // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №2. С. 69-79. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-69-79. EDN: BJZSUK.

Scientific article

Digital Solutions for Dairy Farm Management: a Comparative Analysis of Modern Russian Systems

Viktor V. Rykunov,
assistant, e-mail: RykunovVV@mpei.ru;

Nikolay I. Grebenshchikov,
senior lecturer;

Dmitriy A. Shestov,
Ph.D.(Eng.), senior lecturer

National Research University «MEI», Moscow, Russian Federation

Abstract. *Modern Russian digital solutions for dairy farm management and their compliance with global trends are considered. Attention is focused on the importance of dairy farming for the Russian agro-industrial complex, as well as on the problems of traditional management methods and the advantages of digitalization supported by government programs. (Research purpose) The research purpose is conducting a comparative analysis of modern Russian dairy farm management systems (Musoft, ARKA, M-Complex, MILK 2.0, Smart Farm 4.0) to determine their functionality, level of automation and applicability for farms of various scales, as well as comparing with global counterparts to assess competitiveness. (Materials and methods) We analyzed the descriptions of systems, scientific publications and open sources about global platforms (Afimilk, DeLaval DelPro, VAS DairyComp 305, UNIFORM-Agri, GEA DairyNet Herd, MilkingCloud, AgriWebb). (Results and discussion) They gave an overview of each Russian system: Musoft – universal for any scale, but not integrated with robots; ARKA – uses artificial intelligence to monitor health and risks, focused on medium and large farms; M-Complex – modular, with an emphasis on resource planning and management; MOLOKO 2.0 – cloud system with convenient data entry and genealogy function; Smart Farm 4.0 – integrated with robotic milking machines, suitable for small automated farms. It has been established that comparison with international systems reveals their superiority in the field of the Internet of Things and automation (for example, DeLaval DelPro and Afimilk), however, Russian systems stand out for their accessibility and adaptation to local conditions. (Conclusions) We have shown that Russian systems are competitive for small farms, but need to be modernized in order to meet global standards. It was recommended to choose a system based on the scale and resources of a particular farm.*

Keywords: *digitalization of agriculture, dairy farm management, comparative analysis, AI in livestock, robotic equipment, Russian management systems, global analogs.*

For citation: Rykunov V.V., Grebenshchikov N.I., Shestov D.A. Digital solutions for dairy farm management: a comparative analysis of modern Russian systems. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 69-79 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-69-79. EDN: BJZSUK.

Молочное животноводство – важная отрасль сельского хозяйства России, которая вносит значительный вклад в производство продуктов питания [1-10]. По данным аналитических центров *Milknews* и Союзмолоко, производство товарного молока в России за январь-ноябрь 2025 года выросло на 2,5% к аналогичному периоду 2024 года и составило 24,8 млн т (в сельхозорганизациях – на 4,6%, до 19,3 млн т) (Производство товарного молока выросло на 2,5%. *Milknews*. 2026. URL: <https://milknews.ru/analitika-rinka-moloka/rinok-moloka-v-Rossii/moloko-analitika-dekabr-2025.html>). Прогноз на 2025 год – около 26,3 млн т товарного молока (на уровне 2024 года) (Союзмолоко: в 2025 году производство товарного молока в России сохранится на уровне прошлого года. *Milknews*. 2025. URL: <https://milknews.ru/index/moloko/moloko-tovarnoye-byelov.html>).

Однако управление молочными фермами связано со множеством сложностей: от точного учета поголовья и контроля здоровья животных до повышения

продуктивности и оптимизации процессов [11, 12]. Традиционные методы, основанные на ручном учете и субъективных оценках, не соответствуют современным требованиям к эффективности и масштабируемости, особенно для крупных агропредприятий.

Актуальность исследования обусловлена низкой доходностью отрасли, приводящей к стагнации производства и сокращению поголовья коров в ряде регионов. Средняя продуктивность коров в сельхозорганизациях России в 2025 году выросла (по предварительным оценкам на 4-5%), достигнув порядка 8-9 тыс. кг молока на корову в год, но остается примерно в 1,5-2 раза ниже, чем в ведущих странах ЕС и США (где средний надой достигает 10 000-12 000 кг на корову в год) (Молочная продуктивность коров в России выросла на 4,5% за 9 месяцев 2025 года. *DairyNews*. URL: <https://dairynews.today/kz/news/molochnaya-produktivnost-korov-v-rossii-vyrosla-na-4-5-za-9-mesyatsev-2025-goda.html>; Союзмолоко: Россия вошла в ТОП-20 стран мира по продуктивности коров. *Milknews*. 2024 (актуально 2025). URL:

<https://milknews.ru/analitika-rinka-moloka/reitingi/Rossija-v-TOP-20-po-produktivnosti-korov.html>). Это повышает себестоимость молока и приводит к потерям в объеме и качестве продукции (до 25% от потенциала из-за неэффективного управления, болезней животных и низкой конверсии кормов) [2]. Кроме того, отрасль сталкивается с ущербами от болезней животных, например, мастит вызывает потери до 10-15% годового удоя на большую корову и составляет одну из основных причин выбраковки (до 15-20% в структуре выбытия) (Эксперты предупредили об опасных последствиях мастита у КРС. *DairyNews*. 2022 (актуально 2025). URL: <https://dairynews.ru/news/eksperty-predupredili-ob-opasnykh-posledstviyakh-m.html>; Комплексный подход к профилактике и лечению мастита КРС. Свое Фермерство. 2022 (актуально). URL: <https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/articles/kompleksnyj-podhod-k-profilaktike-i-lecheniju-mastita-krk>).

Цифровизация сельского хозяйства в России открывает новые возможности для решения этих проблем. Внедрение цифровых технологий, таких как искусственный интеллект (ИИ), интернет вещей (IoT), облачные платформы и роботизированное оборудование, позволяет автоматизировать рутинные задачи, повысить точность данных и оптимизировать использование ресурсов.

В России цифровизация АПК поддерживается ведомственным проектом «Цифровое сельское хозяйство» Министерства сельского хозяйства РФ (паспорт утвержден в 2019 году, реализация в 2019-2024 годах с последующими корректировками и продлением), его цель – цифровая трансформация отрасли через внедрение платформенных решений и федеральной государственной информационной системы (Распоряжение Правительства РФ от 23.11.2023 № 3309-р «Стратегическое направление в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года»). URL: <http://static.government.ru/media/files/vepsdSF4HAvOczziSpat234AqZVYrZ9t.pdf>) [3]. Как отмечается в исследовании тенденций цифрового сельского хозяйства, «внедрение беспилотных технологий и автоматизированных систем в животноводстве позволяет увеличить производительность на 15-20% за счет точного мониторинга и прогнозирования» [1]. Несмотря на очевидные преимущества, такие как рост производительности и снижение потерь, внедрение цифровых решений сталкивается с вызовами: высокая стоимость технологий, нехватка квалифицированных кадров и ограниченная инфраструктура, особенно в удаленных районах.

На российском рынке представлены несколько систем управления молочными фермами, таких как *Musoft*, *АРКА*, *M-Complex*, «МОЛОКО 2.0» и «Умная ферма 4.0». Эти решения предлагают широкий набор инструментов для автоматизации учета, мониторинга и управления, но отличаются по функциональности, уровню автоматизации и применимости для хозяйств разного размера. В настоящем исследовании авторы сравнили эти системы, чтобы выявить их сильные и слабые стороны и помочь оптимизировать управление молочными фермами.

Цель исследования – провести сравнительный анализ современных российских систем управления молочными фермами (*Musoft*, *АРКА*, *M-Complex*, «МОЛОКО 2.0», «Умная ферма 4.0») для определения их функциональных возможностей, уровня автоматизации и применимости для хозяйств различного масштаба, а также сравнить с глобальными аналогами для оценки конкурентоспособности. Исследование направлено на выявление оптимальных решений для повышения эффективности управления молочными фермами.

Материалы и методы. Изучили описания систем управления молочными фермами, предоставленные производителями на официальных сайтах. Рассмотрели системы: *Musoft*, *АРКА*, *M-Complex*, «МОЛОКО 2.0» и «Умная ферма 4.0». Анализ выполнили по следующим критериям: функциональные возможности (учет поголовья, контроль продуктивности, ветеринарный мониторинг, кормовой контроль, аналитика, управление оборудованием), степень автоматизации, интеграция с роботизированным оборудованием, доступность интерфейса и целевая аудитория.

Данные о системах систематизировали и сравнили на основе их описанных характеристик. Также проанализировали научные статьи, посвященные цифровизации сельского хозяйства, опубликованные в рецензируемых журналах за последние пять лет, для оценки актуальности и эффективности подобных решений [1-3]. С целью сравнения с глобальными аналогами использовали сведения из открытых источников о системах *Afimilk*, *DeLaval DelPro*, *VAS DairyComp 305*, *UNIFORM-Agri*, *GEA DairyNet Herd*, *MilkingCloud* и *AgriWebb* [4-10]. Методология включала качественный сравнительный анализ и обобщение данных.

Обоснование критериев сравнения. Выбранные критерии сравнения систем управления молочными фермами обоснованы их влиянием на производственную и экономическую эффективность хозяйств, что подтверждается результатами отечественных и

зарубежных исследований в области цифровизации животноводства [1, 3].

Учет поголовья служит базовой функцией, обеспечивающей контроль численности и движения животных, снижение управленческих ошибок и минимизацию потерь, связанных с выбраковкой, падежом и некорректным планированием ресурсов. Наличие актуальной информации по стаду рассматривается в литературе как необходимое условие повышения управляемости молочного производства.

Контроль продуктивности позволяет устанавливать влияние технологических, кормовых и физиологических факторов на уровень надоев и качество молока. Аналитика продуктивности используется для принятия управленческих решений, направленных на стабилизацию и рост производственных показателей, что напрямую отражается на рентабельности хозяйства.

Ветеринарный учет оказывает существенное влияние на экономические показатели за счет профилактики заболеваний, своевременного выявления отклонений в состоянии животных и снижения потерь продукции. В научных публикациях подчеркивается, что заболевания молочного скота (в частности, мастит) – одна из основных причин снижения объемов реализуемого молока и роста затрат на лечение, что делает этот критерий критически значимым для оценки систем управления.

Кормовой контроль и управление рационом рассматриваются как ключевые факторы оптимизации затрат, поскольку корма формируют значительную долю себестоимости молочной продукции. Применение цифровых инструментов для расчета и корректировки рационов способствует повышению эффективности использования кормов и снижению перерасхода ресурсов.

Производственная аналитика и отчетность обеспечивают комплексную оценку деятельности фермы, дают возможность определять риски, прогнозировать изменения производственных показателей и повышать обоснованность управленческих решений. Этот функционал рассматривается как инструмент интеграции данных из различных подсистем в единую модель управления хозяйством.

Интеграция с технологиями ИИ и роботизированным оборудованием повышает степень автоматизации процессов, снижает зависимость от человеческого фактора и способствует сокращению трудоемкости операций. В литературе отмечается, что такие решения наиболее эффективны для хозяйств с высоким уровнем технологической оснащенности и крупным поголовьем [3].

Уровни значимости функций. С точки зрения влияния на эффективность работы молочного предприятия функции систем управления могут быть сгруппированы по уровню значимости:

- высокая значимость – ветеринарный учет и контроль продуктивности, поскольку они напрямую связаны с сохранностью животных, качеством молока и объемами производства;
- средняя значимость – кормовой контроль и производственная аналитика, влияющие на оптимизацию затрат и устойчивость производственных процессов;
- низкая значимость – генеалогический и племенной учет, который оказывает ограниченное влияние на текущую экономическую эффективность, но служит важным инструментом долгосрочного развития и селекционной работы.

Такое разделение отражает практику эксплуатации цифровых систем на молочных фермах и соответствует подходам, представленным в научных исследованиях по цифровизации животноводства [1].

Измеряемые критерии. В качестве измеряемых характеристик систем управления в исследовании рассмотрели:

- масштаб поддерживаемого поголовья (от малых фермерских хозяйств до крупных агропредприятий без формальных ограничений);
- периодичность обновления данных, включая возможность работы в режиме, близком к реальному времени, при наличии интеграции с оборудованием;
- точность расчетов и аналитических показателей, заявляемая разработчиками и зависящая от полноты входных данных;
- наличие прогнозных функций, в том числе с использованием элементов ИИ;
- стоимостные параметры, представленные либо в виде открытых тарифов, либо в форме индивидуальных коммерческих предложений;
- интеграция с датчиками и автоматизированным оборудованием, реализуемая в отдельных системах.

Использование указанных критериев позволяет обеспечить сопоставимость анализируемых решений и оценить их применимость для хозяйств различного масштаба и уровня технологической оснащенности.

Результаты и обсуждение.

Обзор систем

1. *Musoft*, разработанная компанией «Агроинтеллект», представляет собой универсальную систему, подходящую для ферм любого масштаба. Она охватывает учет поголовья (идентификация и регистрация животных, отслеживание их истории, включая происхождение, продуктивность и перемещения на ферме); контроль продуктивности (мониторинг удоев,

анализ динамики продуктивности, выявление факторов, влияющих на нее, и формирование прогнозов по стаду); ветеринарный учет (ведение медицинских карт, планирование профилактических мероприятий, учет вакцинаций, обработок и лечения, а также формирование статистики заболеваемости); репродуктивное управление (контроль репродуктивного здоровья, планирование осеменений, отслеживание циклов, прогнозирование отелов и анализ показателей воспроизводства); кормовой контроль (планирование рационов с учетом индивидуальных потребностей, контроль качества кормов, расчет норм кормления и формирование кормовых планов); производственный аналитику (оценка эффективности работы фермы, анализ продуктивности, конверсии кормов, затрат на содержание и рекомендации по оптимизации) и оперативное управление (координация работы персонала, планирование технологических процессов, контроль выполнения задач и формирование отчетности по производственным показателям). Основное преимущество – гибкость, позволяющая использовать систему как на небольших фермах с пятью коровами, так и на крупных агрокомплексах. Однако в описании не указана интеграция с роботизированным оборудованием, что может ограничивать ее применение на высокоавтоматизированных фермах (*Musoft*. URL: <https://musoft.ru>) [1].

2. АРКА, созданная Алексеем Хахуновым, применяет ИИ для мониторинга здоровья и продуктивности животных. Система доступна через веб-интерфейс, что обеспечивает удобство использования с любого устройства. АРКА акцентирует внимание на здоровье животных (ИИ непрерывно следит за физиологическим состоянием, выявляя отклонения, болезни и угрозы); продуктивности (оценивает производственные показатели, такие как надой, прирост массы, репродукция, и дает прогнозы с рекомендациями); рисках (предсказывает проблемы со здоровьем, оценивает риски заболеваемости и планирует профилактику); управлении стадом (ведет учет поголовья, отслеживает историю заболеваний, вакцинаций и продуктивные данные каждого животного); автоматизации (контролирует операции вроде кормления, доения, уборки, формирует отчеты и дает рекомендации по оптимизации); кормлении (рассчитывает рацион с учетом потребностей животных, анализирует качество кормов и дает советы по питанию) и аналитике (собирает и обрабатывает данные о состоянии стада и эффективности процессов, предлагая рекомендации по улучшению хозяйства). ИИ-аналитика позволяет выявлять отклонения в состоянии животных и

предлагать рекомендации. Система ориентирована на фермы с поголовьем более 100 голов, с круглосуточным мониторингом через датчики. Недостатком служит отсутствие информации о поддержке небольших ферм, что может указывать на ориентацию на средние и крупные хозяйства (*ARKA*. URL: <https://arka.dev>) [1].

3. *M-Complex*, разработанная компанией «М-Комплекс Софт», имеет модульную структуру, включающую зоотехнический модуль (учет и контроль развития животных от рождения до продуктивного периода, включая племенной учет, оценку продуктивности и формирование стад по различным критериям); ветеринарный контроль (мониторинг здоровья животных, планирование профилактических мероприятий, учет заболеваний, вакцинаций и лечения, с возможностью создания электронных историй болезни); кормовой блок (оптимизация рационов с учетом индивидуальных потребностей животных, контроль качества кормов, расчет норм кормления и формирование кормовых планов); производственный учет (отслеживание показателей продуктивности, контроль воспроизводства, учет движения животных и формирование отчетности по производственным показателям); планирование работ (организация графика ветеринарных мероприятий, осеменений, вакцинаций и других процессов с автоматическим напоминанием о важных событиях); аналитику стада (оценка эффективности производства, включая анализ продуктивности, воспроизводства, затрат на содержание и прогнозирование развития стада) и управление ресурсами (контроль использования кормов, медикаментов, расходных материалов и оборудования, планирование закупок и оптимизация расходов). Модульная структура делает ее гибкой, но отсутствие упоминаний об интеграции с роботизированным оборудованием может быть ограничивающим фактором для современных ферм. Точность исполнения рационов достигает 98% (*M-Complex*. URL: <https://m-complex.org>).

4. «МОЛОКО 2.0», разработанная «РЦ Плинор», представляет собой облачное решение с акцентом на удобство ввода данных и планирование задач. Система содержит ввод событий (удобный способ регистрировать все события на ферме); карточку животного (включает данные о родословной, здоровье, продуктивности, кормлении и вакцинации каждой коровы); генеалогию (обширная информация о происхождении животных и племенной ценности их предков); календарь-планировщик (помогает автоматизировать планирование работ, ставить задачи и контролировать их выполнение, минимизируя ри-

ски); аналитику (собирает, анализирует и визуализирует данные о здоровье, развитии, воспроизводстве и производственных показателях животных) и схемы лечения (формирует индивидуальные схемы лечения, контролирует дозировки и оценивает результаты). Она ориентирована на широкий круг пользователей, включая селекционеров, и подходит для ферм любого масштаба. Стоимость от 300 руб. за голову. Интеграция с оборудованием (весы, доильное оборудование) обеспечивает высокий уровень автоматизации. Однако функционал, связанный с автоматизацией оборудования, не упоминается, что может снижать ее конкурентоспособность на рынке (МОЛОКО 2.0. URL: <https://moloko2.pro>).

5. «Умная ферма 4.0» выделяется интеграцией с роботизированным оборудованием, таким как доильные роботы «Волшебник 2.0». Система собирает данные с датчиков, анализирует их и предоставляет рекомендации через настраиваемый дашборд. Она поддерживает мониторинг и управление оборудованием (полный контроль над оборудованием через дашборд, настройка параметров, получение уведомлений о сбоях и оптимизация процессов в реальном времени); карточку животного (подробная информация о каждой корове: здоровье, продуктивность, визиты к доильным роботам, данные о кормлении, воспроизводстве и вакцинации); аналитику здоровья и продуктивности (визуализация трендов через графики и цветковые индикаторы), планирование и задачи (календарь для планирования отелов,

сухостоев, лечения и других задач; доступ с любого устройства позволяет регистрировать события и выполнять задачи на ходу, синхронизируя данные с командой) и схемы лечения (создание индивидуальных протоколов лечения, контроль дозировок и мониторинг результатов; система минимизирует ошибки и оптимизирует использование медикаментов). Основное преимущество – высокая степень автоматизации и интеграция с оборудованием, что делает ее особенно подходящей для небольших ферм с роботизированными системами. Однако высокая стоимость внедрения может быть барьером для малых хозяйств (Умная ферма 4.0. URL: <https://iskra-soft.ru/>) [2].

Сравнительный анализ

Российские системы (*Musoft*, *АРКА*, *M-Complex*, «МОЛОКО 2.0», «Умная ферма 4.0») обладают схожими базовыми функциями: учет поголовья, контроль продуктивности, ветеринарный мониторинг, кормовой контроль и аналитика. Основные различия проявляются в уровне автоматизации, интеграции с ИИ и роботизированным оборудованием, облачном доступе и рекомендуемом масштабе применения.

Для наглядного сравнения ключевых характеристик представлена **таблица**, включающая российские системы и наиболее близкие глобальные аналоги.

«Умная ферма 4.0» выделяется благодаря поддержке роботизированного оборудования и применению данных с датчиков, что соответствует современным тенденциям цифровизации и позволяет автоматизи-

Сравнение ключевых характеристик систем управления молочными фермами Comparison of key characteristics of dairy farm management systems										
Характеристика	<i>Musoft</i>	<i>АРКА</i>	<i>M-Complex</i>	МОЛОКО 2.0	Умная ферма 4.0	<i>Afmilk</i>	<i>DelPro</i>	<i>Dairy Comp</i>	<i>UNIFORM</i>	<i>GEA Dairy Net</i>
Учет поголовья	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Контроль продуктивности	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ветеринарный учет	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Кормовой контроль	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Производственная аналитика	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Интеграция с ИИ	–	+	–	–	–	–	+	–	Частично	+
Интеграция с роботами	–	+	–	–	+	+	+	+	+	+
Облачный доступ	–	+	–	+	Частично	+	+	–	+	+
Степень автоматизации	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Рекомендуемый масштаб хозяйства	Любой	>100	Любой	Любой	Малые/средние	Любой	Любой	>500	Средние	Любой

ровать процессы в реальном времени, снижая трудозатраты и повышая точность мониторинга [3]. Как подчеркивается в анализе аспектов цифровизации технологий и машин в АПК, «интеграция роботизированных систем с датчиками *IoT* обеспечивает до 30% снижение энергозатрат на автоматизированных фермах». АРКА уникальна за счет применения ИИ для прогнозирования рисков и анализа сведений, что повышает ее ценность для крупных ферм, где важна предиктивная аналитика для предотвращения заболеваний и оптимизации продуктивности [1]. *Musoft* и «МОЛОКО 2.0» универсальны и подходят для хозяйств любого масштаба благодаря широкому спектру базовых функций и удобству использования, но их функционал ограничен в плане интеграции с роботами и ИИ, что делает их более подходящими для традиционных ферм без высокой автоматизации. *M-Complex* предлагает модульный подход, позволяющий настраивать систему под конкретные нужды, включая управление ресурсами и планирование работ, но также не поддерживает роботизированное оборудование, что может быть недостатком для инновационных хозяйств.

Сравнение с глобальными аналогами

Чтобы оценить конкурентоспособность российских систем управления молочными фермами, полезно сравнить их с лучшими международными платформами. Далее представлен подробный анализ ключевых глобальных аналогов (см. таблицу для сравнения).

1. *Afimilk* (Израиль/США) – одна из ведущих систем для управления молочными фермами, предлагающая комплексное решение с акцентом на мониторинг здоровья коров, анализ качества молока и интеграцию с доильным оборудованием. Система использует ИИ для предиктивной аналитики, включая прогнозирование отелов и выявление заболеваний на ранних стадиях, что делает ее схожей с АРКА, но превосходит ее по уровню интеграции с роботизированными системами, такими как автоматические доильные установки и датчики *IoT*. *Afimilk* поддерживает облачный доступ и мобильные приложения, обеспечивая гибкость для ферм любого масштаба. По данным на 2025 год, система используется более чем в 100 странах и охватывает свыше 25 млн коров. Однако высокая стоимость лицензий (от 5000 USD в год) и оборудования делает ее менее доступной для малых хозяйств по сравнению с *Musoft* или «МОЛОКО 2.0» (*Afimilk*. URL: <https://www.afimilk.com>) [4].

2. *DeLaval DelPro* (Швеция) – платформа, интегрированная с роботизированными доильными системами и датчиками, предоставляющая данные

в реальном времени через настраиваемые дашборды. Она охватывает мониторинг продуктивности, здоровья, кормления и управления оборудованием, включая автоматизированный контроль за доением и кормлением, что делает ее прямым аналогом «Умной фермы 4.0». *DelPro* отличается высокой степенью автоматизации и поддержкой *IoT* с возможностью интеграции с более чем 50 типами оборудования. В 2025 году система лидирует на европейском рынке, с фокусом на устойчивость и снижение выбросов. Однако требует значительных инвестиций в оборудование (от 100 000 USD), что может быть барьером для небольших ферм, в отличие от российских систем, ориентированных на доступность (*DeLaval*. URL: <https://www.delaval.com>) [5].

3. *VAS DairyComp 305* (США) от *Valley Agricultural Software* – популярная система в США, используемая на ~50-70% молочных ферм. Она предлагает модульную структуру, аналогичную *M-Complex*, с акцентом на учет поголовья, репродуктивное управление и ветеринарный мониторинг, включая детальную аналитику по генетике и продуктивности. Система поддерживает кастомизацию и интеграцию с оборудованием, но ее интерфейс менее интуитивен по сравнению с облачными решениями, такими как «МОЛОКО 2.0» или АРКА. В 2025 году обновления включают улучшенную ИИ-аналитику для прогнозирования. *DairyComp 305* ориентирована на крупные фермы (свыше 500 голов), что ограничивает ее применимость для малых хозяйств [6].

4. *UNIFORM-Agri* (Нидерланды) – облачная система, схожая с «МОЛОКО 2.0», с акцентом на учет поголовья, генеалогию, планирование задач и аналитику. Она поддерживает интеграцию с доильными системами и датчиками, но в меньшей степени, чем «Умная ферма 4.0» или *DeLaval DelPro*. *UNIFORM-Agri* подходит для ферм среднего размера и отличается простотой интерфейса, с мобильным доступом для регистрации событий в реальном времени. В 2025 году система расширила функционал по устойчивому кормлению, что актуально для европейских стандартов. Ее конкурентоспособность в сравнении с российскими аналогами заключается в доступности (от 2000 EUR в год) [7].

5. *GEA DairyNet Herd* (Германия) – платформа для мониторинга стада в реальном времени, интегрированная с автоматизированным оборудованием. Она использует ИИ для анализа данных и рекомендаций, сочетая черты АРКА и «Умная ферма 4.0», включая визуализацию трендов и автоматизированные отчеты. Система поддерживает облачный доступ и дашборды, но ее высокая стоимость (от 3000 EUR)

и сложность внедрения делают ее менее привлекательной для малых хозяйств по сравнению с российскими решениями. В 2025 году *GEA* фокусируется на интеграции с системами точного земледелия [8].

6. *MilkingCloud* (Турция/Глобально) – облачная платформа для управления молочными фермами, предлагающая инструменты для отслеживания удоев, здоровья животных и кормления в реальном времени. Система интегрируется с мобильными приложениями и датчиками, аналогично «МОЛОКО 2.0», но добавляет ИИ для анализа данных и прогнозирования. Она используется более чем 15 000 фермами глобально и подходит для средних хозяйств благодаря низкой стоимости (от 100 *USD* в месяц). По сравнению с российскими системами, *MilkingCloud* выделяется простотой и фокусом на мобильность, но уступает в глубине ветеринарного модуля [9].

7. *AgriWebb* (Австралия/Глобально) – мобильно-ориентированная система для управления стадом с акцентом на отслеживание скота, кормление и воспроизводство. Она поддерживает интеграцию с *GPS*-датчиками и дронами для мониторинга пастбищ, что делает ее аналогом *M-Complex* по модульности, но с большим уклоном в *IoT*. В 2025 году *AgriWebb* лидирует в Азиатско-Тихоокеанском регионе, с ценой от 500 *AUD* в месяц. По сравнению с российскими аналогами, она превосходит по интеграции с внешними устройствами, но менее адаптирована для холодного климата [10].

Сравнение с российскими системами

Глобальные аналоги, такие как *Afimilk* и *DeLaval DelPro*, демонстрируют более высокую степень интеграции с роботизированным оборудованием и ИИ, что дает им преимущество в высокотехнологичных хозяйствах с большим поголовьем. Например, *DeLaval* и *GEA* предлагают полную автоматизацию процессов доения, чего не достигают большинство российских систем, за исключением «Умной фермы 4.0». Однако российские системы, такие как *Musoft* и «МОЛОКО 2.0», выигрывают за счет универсальности и доступности для малых и средних ферм, где бюджеты ограничены (стоимость от 500–2000 *USD* в год). «Умная ферма 4.0» приближается к глобальным стандартам по интеграции с оборудованием, но ее возможности ограничены по сравнению с *Afimilk* или *GEA DairyNet Herd*, которые предлагают более глубокую аналитику и поддержку *IoT* для миллионов животных.

АРКА конкурирует с *Afimilk* и *GEA* по использованию ИИ, но ее применимость для малых ферм требует уточнения. *M-Complex* сопоставима с *VAS DairyComp 305* по модульности, но уступает в ин-

теграции с роботами. Дополнительные аналоги, такие как *MilkingCloud* и *AgriWebb*, подчеркивают тенденцию к мобильности и облачным решениям, где российские системы могут укрепить позиции посредством локализации. Российские системы в целом адаптированы к локальным условиям, включая поддержку на русском языке и соответствие нормативным требованиям, что делает их конкурентоспособными в условиях импортозамещения.

Цифровизация молочных ферм открывает значительные возможности для повышения эффективности управления, снижения затрат и улучшения благополучия животных, что подтверждается как российскими, так и международными исследованиями [1, 4]. Российские системы, такие как *Musoft*, АРКА, *M-Complex*, «МОЛОКО 2.0» и «Умная ферма 4.0», предлагают широкий спектр функций, охватывающих ключевые аспекты управления фермой, но их возможности различаются в зависимости от степени автоматизации, интеграции с оборудованием и использования передовых технологий, например ИИ.

Сравнение с глобальными аналогами показывает, что российские системы конкурентоспособны в сегменте малых и средних хозяйств благодаря их универсальности и относительно низкой стоимости внедрения. Например, *Musoft* и «МОЛОКО 2.0» идеально подходят для традиционных ферм с ограниченным бюджетом, где не требуется сложная интеграция с роботами. Их функционал – учет поголовья, контроль продуктивности и ветеринарный мониторинг – сопоставим с международными решениями, такими как *UNIFORM-Agri*, но адаптирован к локальным условиям, включая поддержку на русском языке и учет российских стандартов [2]. В обзоре основных областей цифровой трансформации в сельском хозяйстве отмечается, что «для малых ферм ключевым фактором успеха является простота интерфейса и низкие затраты на внедрение, что характерно для отечественных платформ».

«Умная ферма 4.0» и АРКА выделяются среди российских систем интеграцией с роботизированным оборудованием, что делает их сопоставимыми с *DeLaval DelPro* и *GEA DairyNet Herd*. Однако высокая стоимость внедрения может ограничивать применение на малых фермах, что подчеркивает необходимость разработки более доступных решений с поддержкой роботизированного оборудования [3].

АРКА демонстрирует потенциал в использовании ИИ, что ставит ее в один ряд с *Afimilk*, но ее эффективность для малых хозяйств требует дальнейшего изучения. *M-Complex* благодаря модульной структуре конкурирует с *VAS DairyComp 305*, но отсутствие

интеграции с роботами снижает ее привлекательность для высокотехнологичных ферм.

Ключевым вызовом для российских систем остается их ограниченная интеграция с современными технологиями *IoT* и робототехники по сравнению с глобальными аналогами. Например, *Afimilk* и *DeLaval DelPro* используют данные с датчиков для более точного мониторинга и прогнозирования, что позволяет минимизировать риски и оптимизировать производственные процессы [4, 5]. Российские разработки, за исключением «Умной фермы 4.0», пока отстают в этом аспекте, что может быть связано с ограниченными инвестициями в НИОКР и нехваткой специалистов в области агротехнологий [2]. Аналогично в анализе цифровизации как инструмента повышения эффективности в животноводстве подчеркивается, что «автоматизация процессов кормления и мониторинга здоровья в свиноводстве (и по аналогии в молочном скотоводстве) может повысить общую продуктивность на 25%, но требует инвестиций в квалифицированные кадры».

Для дальнейшего развития российского рынка цифровых решений необходимо сосредоточиться на нескольких направлениях: усиление интеграции с роботизированным оборудованием для поддержки высокотехнологичных ферм; развитие ИИ-функционала для предиктивной аналитики, что повысит конкурентоспособность систем, таких как АРКА; снижение стоимости внедрения для малых хозяйств, чтобы обеспечить их доступ к цифровым технологиям; подготовка кадров и развитие инфраструктуры для поддержки цифровизации в удаленных регионах [3]. Перспективы цифровизации молочных ферм в России связаны с государственной поддержкой, включая программы субсидирования и обучения, а также с необходимостью адаптации глобальных технологий к локальным условиям. Российские системы имеют потенциал занять лидирующие позиции в сегменте доступных решений, особенно в условиях импортозамещения, но их дальнейшее развитие должно учитывать опыт международных лидеров, таких как *Afimilk* и *DeLaval*. Как указывается в обзоре цифровизации животноводства, «будущие тенденции включают комбинацию ИИ и робототехники для создания полностью автономных ферм, что особенно актуально для российского АПК с учетом климатических вызовов».

Выводы. Российские системы управления молочными фермами демонстрируют высокий потенциал для повышения эффективности отрасли, особенно в условиях импортозамещения. Они обеспечивают базовые функции (учет поголовья, контроль продук-

тивности, ветеринарный мониторинг, аналитика), выделяются доступностью и адаптацией к локальным условиям (русский интерфейс, соответствие нормативам, поддержка разработчиков). Однако по уровню интеграции ИИ и робототехники они в целом отстают от глобальных лидеров, за исключением отдельных решений.

АРКА и «Умная ферма 4.0» предлагают наибольшую степень автоматизации среди рассмотренных. *Musoft*, *M-Complex* и «МОЛОКО 2.0» остаются универсальными и экономичными, идеальными для ферм без сложной автоматизации.

Рекомендации по применению (основаны на функциональности, сложности интерфейса, интеграции с оборудованием и типичном масштабе ферм):

- Для малых и небольших ферм (до 300-500 голов), особенно с роботизированным доением: «Умная ферма 4.0» – наиболее подходящий вариант. Система проще в освоении, напрямую интегрирована с доильными роботами (в том числе «Волшебник 2.0»), обеспечивает полный контроль оборудования в реальном времени через дашборд, минимизирует ручной ввод и подходит для ферм с ограниченным штатом.

- Для средних и крупных ферм (от 300-500 голов и выше), где важны глубокая аналитика, ИИ-прогнозы и предиктивный контроль рисков: АРКА – оптимальный выбор. Система сложнее в освоении (более детальная аналитика, конструктор отчетов, прогнозы ИИ по стаду на год вперед), но ближе по функционалу к *VAS DairyComp 305* (перенос данных из нее возможен). Поддерживает интеграцию с доильными залами и датчиками (сигналы о надоях, активности), позволяет автоматизировать задачи и снижать выбраковку/сервис-период. Подходит для ферм, где есть опыт с подобными программами и требуется максимум предиктивных инструментов.

- Для ферм любого масштаба без высокой автоматизации (традиционное доение, ограниченный бюджет, простой интерфейс): *Musoft*, *M-Complex* или «МОЛОКО 2.0». Эти системы универсальны, недороги (например, от 300 руб/голова в «МОЛОКО 2.0»), модульны и не требуют сложной интеграции с роботами. *Musoft* и «МОЛОКО 2.0» особенно удобны для быстрого старта и малого штата; *M-Complex* – для тех, кто хочет гибкую настройку под конкретные процессы (планирование, ресурсы).

Для всех систем рекомендуется начинать с демо/аудита у разработчика и обучения ключевых сотрудников (зоотехник, ветеринар). Выбор следует делать исходя из текущего оборудования, бюджета на внедрение и желаемого уровня аналитики/автоматизации.

Библиографический список

1. Белоглазов П.Г. Цифровизация в животноводстве – новые тенденции современного мира // *Аграрная наука*. 2022. N12. С. 144-148. EDN: LZSPBP.
2. Минеева Н.Н. Проблемы цифровизации сельского хозяйства России // *Эпомен*. 2022. N67. С. 35-47. EDN: DRLZYQ.
3. Петухова М.С., Агафонова О.В. Теоретико-методологический фундамент цифровой трансформации сельского хозяйства России: базовые понятия и этапы // *Аграрный вестник Урала*. 2023. Т. 23. N4. С. 79-89. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-233-04-79-89. EDN: HCYKDP.
4. Hassoun A., Garcia-Garcia G., Trollman H. et al. Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. *Current Research in Food Science*. 2023. Vol. 7. 100535. DOI: 10.1016/j.crfs.2023.100535.
5. Gupta G., Kumar Pal S. Applications of AI in precision agriculture. *Discover Agriculture*. 2025. Vol. 3. Iss. 1. DOI: 10.1007/s44279-025-00220-9.
6. Виноградов А.В. Актуальные вопросы развития электроснабжения АПК // *Агротехника и энергообеспечение*. 2022. N1(34). С. 5-15. EDN: ODWFGD.
7. Провоторова Л.И. Цифровизация сельского хозяйства: перспективы и риски // *Сифра. Экономика*. 2023. N2(2). DOI: 10.23670/ECNMS.2023.2.13. EDN: ZKMKBM.
8. Эпштейн Д.Б. Цифровая трансформация АПК и ее проблемы // *Российский экономический журнал*. 2023. N3. С. 63-80. DOI: 10.52210/0130-9757_2023_3_63. EDN: NMICSY.
9. Александрова Н.Р. Цифровизация сельского хозяйства: тенденции и перспективы развития // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2024. N2(52). С. 25-30. EDN: YYLRCY.
10. Краузе Д.П. Электротехнологии и электрооборудование в АПК: история и вызовы // *Наука и образование*. 2025. Т. 8. N2. 242. EDN: QLXRWJ.
11. Тихомиров Д.А., Виноградов А.В. Научные проблемы и практические решения по эффективному и стабильному энергообеспечению объектов животноводства // *Техника и технологии в животноводстве*. 2022. N2(46). С. 37-45. DOI: 10.51794/27132064-2022-2-37. EDN: ZUZTV D.
12. Тихомиров Д.А., Тихомиров А.В. Распределенные системы энергоснабжения АПК // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 3-10 EDN: HDBFTU.

References

1. Beloglazov P.G. Digitalization in animal husbandry – new trends in the modern world. *Agrarian Science*. 2022. N12. 144-148 (In Russian). EDN: LZSPBP.
2. Mineyeva N.N. Digitalization in Russian agriculture. *Epomen*. 2022. N67. 35-47 (In Russian). EDN: DRLZYQ.
3. Petukhova M.S., Agafonova O.V. Theoretical and methodological foundation of the digital transformation of agriculture in Russia: basic concepts and stages. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023. Vol. 23. N4. 79-89 (In Russian). DOI: 10.32417/1997-4868-2023-233-04-79-89. EDN: HCYKDP.
4. Hassoun A., Garcia-Garcia G., Trollman H. et al. Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. *Current Research in Food Science*. 2023. Vol. 7. 100535. DOI: 10.1016/j.crfs.2023.100535.
5. Gupta G., Kumar Pal S. Applications of AI in precision agriculture. *Discover Agriculture*. 2025. Vol. 3. Iss. 1. DOI: 10.1007/s44279-025-00220-9.
6. Vinogradov A. The problem of development of electric energy supply of the agricultural complex. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2022. N1(34). 5-15 (In Russian). EDN: ODWFGD.
7. Provotorova L.I. Digitalization of agriculture: prospects and risks. *Cifra. Economics*. 2023. N2(2) (In Russian). DOI: 10.23670/ECNMS.2023.2.13. EDN: ZKMKBM.
8. Epstein D.B. Digital transformation of the agro-industrial complex and its problems. *Russian Economic Journal*. 2023. N3. 63-80 (In Russian). DOI: 10.52210/0130-9757_2023_3_63. EDN: NMICSY.
9. Aleksandrova N.R., Subaeva A.K., Chutcheva Yu.V. Digitalization of agriculture: trends and prospects of development. *Natural Sciences and Humanities Research*. 2024. N2(52). 25-30 (In Russian). EDN: YYLRCY.
10. Krauze D.P. Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex: history and challenges. *Science and Education*. 2025. Vol. 8. N2. 242 (In Russian). EDN: QLXRWJ.
11. Tikhomirov D.A., Vinogradov A.V. Scientific problems and practical solutions for efficient and stable energy supply of livestock facilities. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022. N2(46). 37-45 (In Russian). DOI: 10.51794/27132064-2022-2-37. EDN: ZUZTV D.
12. Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. Distributed power supply systems for agriculture. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019. N3(36). 3-10 (In Russian). EDN: HDBFTU.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All the authors have made an equivalent contribution to the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026

Статья принята к публикации 14.04.2026



Удлинение производственной структуры животноводческих комплексов в условиях внедрения искусственного интеллекта: рыночные и энергетические эффекты региональной интеграции

Татьяна Васильевна Мамонтова,

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник,

e-mail: mamontova.2024@inbox.ru;

Алексей Семенович Дорохов,

доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник;

Владимир Вячеславович Кирсанов,

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник;

Дмитрий Юрьевич Павкин,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

Сергей Сергеевич Юрочка,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Специфика сельского хозяйства и животноводства превращает производство животноводческой продукции в объект управления исключительной сложности. Рассматривается построение каузальной петлевой диаграммы, описывающей усиливающие и балансирующие контуры, возникающие при внедрении искусственного интеллекта в социально-трудовую и производственную систему животноводства. (Цель исследования) Изучить существующий опыт и вектор масштабного применения технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве в рамках пятой промышленной революции; возможные способы включения искусственного интеллекта в систему разделения труда; описать объемы обрабатываемой информации, а также уровень энергопотребления, необходимый для обучения и применения искусственного интеллекта. (Материалы и методы) Обработали фоновую аналитическую информацию, обобщили мнения отраслевых и академических экспертов в области цифровизации сельского хозяйства, животноводства и внедрения искусственного интеллекта в производственные и социально-трудовые системы. (Результаты и обсуждение) Показали, что усиливающие контуры формируются за счет роста объема структурированных данных, снижения управленческой неопределенности и увеличения стадийности производственного контура, тогда как балансирующие петли отражают технологические, энергетические и организационные барьеры внедрения. Рассмотрели трансформацию стадийной структуры производства животноводческой продукции в условиях внедрения искусственного интеллекта, межферменной агрегации данных и региональной координации решений. (Выводы) Использовали для анализа структурных изменений аппарат нормированных единиц капитала, позволяющий концептуально отразить перераспределение и прирост производственного потенциала без привязки к конкретным ценовым параметрам. Произвели оценку энергетического измерения цифровизации животноводства. Установили на основе оценок объема данных, генерируемых на уровне фермы, и потребностей региональной вычислительной инфраструктуры, что искусственный интеллект выступает в качестве капитального блага высших порядков, требующего дополнительных энергетических ресурсов на дальних стадиях производства. **Ключевые слова:** животноводство, овцеводство, стадийная структура производства, искусственный интеллект, энергетический баланс, энергопотребление, цифровизация АПК.

Для цитирования: Мамонтова Т.В., Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Удлинение производственной структуры животноводческих комплексов в условиях внедрения искусственного интеллекта: рыночные и энергетические эффекты региональной интеграции // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. № 2. С. 80-92. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-80-92. EDN: GHNFUI.

Extending the Production Structure of Livestock Farms in the Context of Artificial Intelligence Implementation: Market and Energy Effects of Regional Integration

Tatyana V. Mamontova,

Ph.D.(Agri.), senior researcher, e-mail: mamontova.2024@inbox.ru;

Aleksey S. Dorokhov,

Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the RAS, chief researcher;

Vladimir V. Kirsanov,

Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding member of the RAS, chief researcher;

Dmitriy Yu. Pavkin,

Ph.D.(Eng.), senior researcher;

Sergey S. Yurochka,

Ph.D.(Eng.), senior researcher

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The specifics of agriculture and livestock breeding make the production of livestock products an object of exceptional complexity. The article considers the construction of a causal loop diagram describing the reinforcing and balancing contours that arise when introducing artificial intelligence into the social, labor and production system of livestock breeding. (Research purpose) The research purpose is studying the existing experience and vector of large-scale application of artificial intelligence technologies in agriculture in the framework of the fifth industrial revolution; possible ways to include artificial intelligence in the division of labor; describing the amount of information processed, as well as the level of energy consumption necessary for training and application of artificial intelligence. (Materials and methods) We processed background analytical information, summarized the opinions of industry and academic experts in the field of digitalization of agriculture, livestock and the introduction of artificial intelligence in production and social and labor systems. (Results and discussion) They showed that reinforcing loops are formed by increasing the volume of structured data, reducing managerial uncertainty and increasing the stage of the production circuit, while balancing loops reflect technological, energy and organizational barriers to implementation. We considered the transformation of the stage structure of livestock production in the context of the introduction of artificial intelligence, inter-farm data aggregation and regional coordination of solutions. (Conclusions) To analyze structural changes, the apparatus of rationed capital units was used, which allows to conceptually reflect the redistribution and increase in production potential without reference to specific price parameters. The energy dimension of livestock digitalization was assessed. Based on estimates of the amount of data generated at the farm level and the needs of the regional computing infrastructure, artificial intelligence acts as a capital good of the highest order, requiring additional energy resources in the long-term stages of production.*

Keywords: *animal husbandry, sheep breeding, stage production structure, artificial intelligence, energy balance, energy consumption, digitalization of the agro-industrial complex.*

For citation: Mamontova T.V., Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Extending the production structure of livestock farms in the context of artificial intelligence implementation: market and energy effects of regional integration. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 80-92 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-80-92. EDN: GHNFUL.

Цифровые и интеллектуальные технологии все чаще применяются для развития АПК. Движение всех отраслей в данном направлении потенциально позволит достигать высоких товарных показателей и улучшения в части использования сельскохозяйственных животных [1].

Мировые и отечественные коллективы сегодня развивают роботизированные решения, основанные в том числе и на технологии искусственного интеллекта (ИИ) с целью сокращения затрат на ручной труд человека, снижения стресса у животных при контактных методах ведения селекционной работы, а главное с

целью точного и интеллектуального управления на крупных животноводческих хозяйствах [2-4].

Наиболее активно интеграция технологий ИИ наблюдается в молочном животноводстве. Получило развитие и применение оптических систем для решения инженерных задач в животноводстве [5]. На текущий момент большинство процессов автоматизированы и роботизированы, но оценка экстерьера остается ручной. Ручная оценка экстерьера трудоемка и подвержена человеческому фактору. Процесс служит неотъемлемой частью селекционной работы, особенно сейчас в условиях интенсивного молочного животноводства и превалирующей голштинизации черно-пестрой породы с нарушением опорно-двигательного аппарата, который сокращает и срок производственного применения животного.

Селекционный прогресс обусловлен использованием животных с выдающимися генотипами по интересующим признакам для получения следующего поколения. В целом в стране уже сформирован широкомасштабный вектор осуществления контроля племенных ресурсов животноводческих предприятий [6]. Неплохие результаты по внедрению ИИ в технологические процессы достигнуты в птицеводстве [7, 8]. В овцеводстве внедрение таких технологий идет менее активно, как правило, они чаще применяются на крупных животноводческих комплексах. При этом отмечается высокий потенциал использования именно контактных и бесконтактных датчиков преимущественно для распознавания особей, анализа поведения, измерения параметров тела и физиологического мониторинга [9, 10].

Технологии, объединяющие в себе датчики, роботизацию, интернет вещей (*IoT*), алгоритмы ИИ, применяемые в животноводстве, можно объединить общим термином – технологии неинвазивного мониторинга сельскохозяйственных животных (*Non-invasive Monitoring Technology, NMT*) [11, 12]. Такие технологии стали эффективным решением для мониторинга состояния здоровья, поведения и физиологических показателей животных в режиме реального времени с низким уровнем помех, а также основной движущей силой цифровой трансформации животноводческой отрасли [13].

Цель исследования – изучить существующий опыт и вектор масштабного применения технологий ИИ в сельском хозяйстве в рамках пятой промышленной революции; исследовать возможные способы включения ИИ в систему разделения труда; описать объемы обрабатываемой информации, а также уровень энергопотребления, необходимый для обучения и применения ИИ.

Материалы и методы. Обработали фоновую аналитическую информацию, обобщили мнения отраслевых и академических экспертов в области цифровизации сельского хозяйства, животноводства и внедрения ИИ в производственные и социально-трудовые системы. Экспертные оценки использовали для уточнения логики причинно-следственных связей и верификации концептуальных предположений, заложенных в системную модель исследования. Преимущественно применяли данные с 2015 по 2025 год, что соответствует активной фазе развития и практического внедрения технологий ИИ в агропромышленном комплексе.

Критериями включения информации в анализ стали: фокус на применении ИИ и интеллектуальных систем в животноводстве или смежных сегментах сельского хозяйства; наличие эмпирических данных либо формализованных моделей, позволяющих оценить экономический, производственный или управленческий эффект внедрения ИИ; рассмотрение вопросов масштабирования, интеграции данных или организационных изменений; публикация в рецензируемых научных изданиях. Из анализа исключили работы описательного характера, не содержащие аналитической или методологической новизны, а также исследования, посвященные исключительно техническим аспектам алгоритмов без привязки к социально-экономическому контексту.

На основе отобранных публикаций провели обработку результатов, а также элементарную количественную агрегацию эффектов, представленных в исследованиях (рост продуктивности, снижение издержек, улучшение показателей качества продукции и управляемости процессов).

Сделали вероятностные выводы на базе величины метапроанализированных эффектов, представленных в литературе, с использованием подходов описательной метааналитики и сравнительного анализа диапазонов эффектов, без построения строгой статистической модели вследствие высокой гетерогенности исходных сведений. Для концептуализации полученных результатов использовали метод системной динамики, в рамках которого построили каузальную петлевую диаграмму (*Causal Loop Diagram, CLD*), отражающую ключевые усиливающие и балансирующие связи между уровнем внедрения ИИ, социально-трудовыми изменениями, межферменной агрегацией данных и региональным экономическим эффектом. Модель носит качественный характер и предназначена для выявления системных условий перехода от локальной эффективности отдельных ферм к устойчивому региональному эффекту.

Результаты и обсуждение. Пятая промышленная революция формируется на стыке человекоцентричной автоматизации, когнитивных систем и комплексных цифровых платформ. Основу этой революции составляет интеграция ИИ в социально-трудовые системы на животноводческих фермах, в том числе, где ИИ выполняет не простые нелинейные задачи, а становится частью организационной структуры принятия решений, координации труда и знания. В сельском хозяйстве это переход от автоматизированных и датированных задач к интеллектуальным системам, способным учиться, прогнозировать и оптимизировать процессы в масштабе не одной фермы, а ферм по меньшей мере одного региона. Система не замкнута на одном животноводстве, а работает со сведениями всего агропромышленного контура.

Сельское хозяйство – это традиционный сектор, где инновации сложно внедрять. Судя по отчету ООО «Яков и Партнеры», основанного на ежегодном исследовании об ИИ совместно с компанией «Яндекс», в сельском хозяйстве нет инноваторов, которые одни из первых (с учетом всех отраслей) внедряют технологии. В сельском хозяйстве есть экспериментаторы (17% ферм) – это те, кто испытывает в отрасли уже подтвержденную технологию ИИ в других секторах, и остальные 83% – последователи, которые уже внедряют после того, как 17% ферм экспериментаторов доказали эффективность. Экспериментаторы в животноводстве – не просто 17% ферм, а институциональный слой перевода инновации в отраслевой уклад. Они выполняют функцию, которую следует назвать «шумовой технологический фильтр», где шумом служат многочисленные инновационные разработки уровня готовности технологий (УГТ) 4-7. Взаимодействие животноводческих ферм экспериментаторов в роли «шумового технологического фильтра» и ИИ, как технологии, которая вписана в социально-трудовую и производственную структуру животноводческих ферм, необходимо рассмотреть подробнее.

Рассмотрим каузальную циклическую диаграмму (*рисунок*). Она представляет собой причинно-следственную диаграмму модели, исследующей рост и упадок эффективности от внедрения системы ИИ в животноводческие фермы на региональном уровне. Представленная каузальная петлевая диаграмма отражает системную модель включения ИИ в социально-трудовую и производственную структуру животноводческих ферм с последующим масштабированием на региональный уровень. В основе модели лежит понимание ИИ не как изолированной технологии автоматизации, а как структурного эле-

мента организационно-деятельностного контура, влияющего одновременно на производство, управление, труд и экономические результаты.

Центральное ядро *CLD* образуют взаимосвязанные переменные: уровень внедрения ИИ, объем и структура данных, качество управленческих решений, добавочная стоимость продукции, экономическая эффективность ферм и инвестиции в ИИ. Данное ядро представляет собой классическую усиливающую петлю (R^+), однако в отличие от упрощенных моделей цифровизации, здесь рост нелинейный или технологически детерминированный. Он опосредован изменением структуры принятия решений и усложнением производственного контура.

Рост уровня внедрения ИИ на фермах приводит к увеличению объема и степени структурированности данных. При этом принципиально важно, что сведения в модели рассматриваются не как побочный продукт цифровизации, а как самостоятельный фактор управления, определяющий качество принимаемых решений. Повышение качества управленческих решений, в свою очередь, напрямую связано с формированием добавочной стоимости продукции, что выражается не столько в росте физического объема выпуска, сколько в управлении качественными характеристиками продукции (например, составом и стабильностью молока). Такая логика отражает сдвиг от экстенсивной к интенсивной модели развития животноводства, где ключевым источником экономического эффекта становится управляемость биологических процессов. Это позволяет рассматривать ИИ как инструмент формирования добавочной стоимости через принятие более точных, своевременных и контекстно-зависимых управленческих решений.

Рассмотрели стадийность и усложнение производственного контура как системный узел. Схема содержит узел «стадийность/сложность производственного контура». В рамках модели стадийность трактуется не как следствие роста производственных процессов, а как условие, обеспечиваемое внедрением ИИ. Иными словами, ИИ не просто обслуживает уже существующую сложность, а делает возможным ее появление и устойчивое воспроизводство. Рост стадийности означает увеличение числа управленческих, аналитических и корректирующих стадий между биологическим процессом и конечным продуктом. К таким стадиям относятся мониторинг состояния животных, интерпретация данных, прогнозирование, принятие решений и контроль их исполнения. Каждая дополнительная стадия потенциально увеличивает добавочную стоимость, однако одновременно

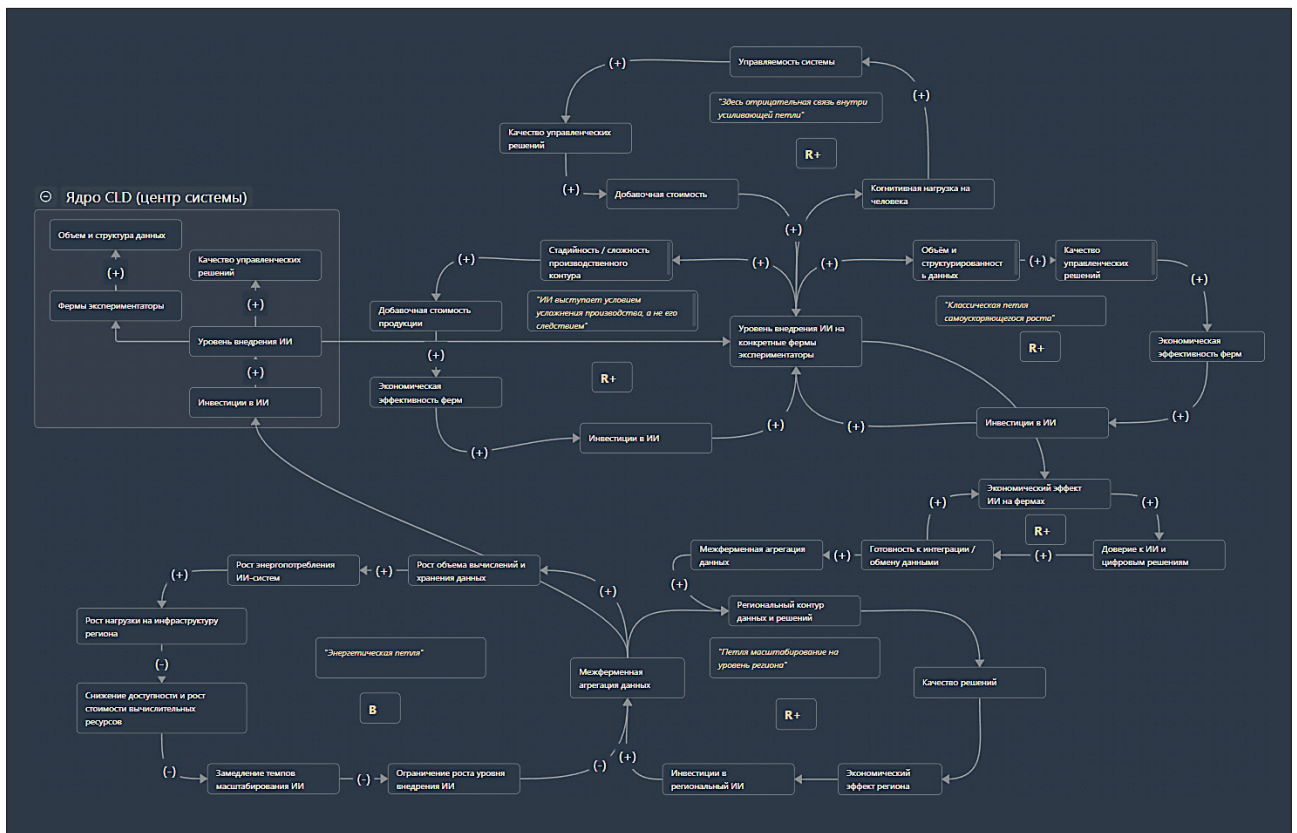


Рис. Каузальная петлевая диаграмма, как отражение системной модели включения искусственного интеллекта в социально-трудовую и производственную структуру животноводческих ферм

Fig. Casual loop diagram as a reflection of a systemic model for incorporating artificial intelligence into the social, labor, and production structure of livestock farms

повышает требования к управляемости системы. В схеме это отражено через балансирующую петлю между ростом стадийности и когнитивной нагрузкой на человека. Без ИИ рост сложности привел бы к перегрузке управленческого контура и снижению эффективности. Но внедрение ИИ снижает когнитивную нагрузку на человека, компенсируя усложнение системы и тем самым поддерживая усиливающую петлю роста ($R+$). В этом смысле ИИ выступает как механизм перераспределения когнитивного труда, а не его устранения.

Проанализируем когнитивную нагрузку на человека, управляемость и качество решений. В традиционных моделях автоматизации этот аспект часто игнорируется, однако в условиях животноводства, как биологически и организационно сложной системы, он становится критическим. Снижение когнитивной нагрузки за счет ИИ повышает управляемость системы, что напрямую влияет на качество управленческих решений. В представленной *CLD* эта логика формирует усиливающую петлю, несмотря на наличие отрицательной связи внутри нее (снижение нагрузки приводит к росту управляемости). Такой тип петель характерен для системной динамики и

отражает нелинейный характер социально-трудовых процессов. ИИ в модели выполняет функцию когнитивного медиатора, позволяющего человеку оперировать более сложными системами без потери управляемости. Это принципиально отличает пятую промышленную революцию от предыдущих этапов автоматизации, где основным эффектом было вытеснение человеческого труда, а не его когнитивное усиление.

Сегодня фермы-экспериментаторы в ядре *CLD* выполняют следующую роль. В модели на *рисунке* они представлены не как статистическая группа, а как системный элемент, обеспечивающий воспроизводство инновационного контура. Экспериментаторы способствуют росту объема и структуры данных, повышению качества управленческих решений и легитимации ИИ в отрасли. Через их деятельность формируется доказательная база эффективности ИИ, что снижает неопределенность и стимулирует инвестиции, в свою очередь, экспериментаторы усиливают центральную петлю роста, одновременно выполняя функцию фильтра, предотвращающего распространение неэффективных или неприменимых решений.

Следом за микроуровневым анализом, который был проведен выше, следует обсудить региональный уровень *CLD*. Переход от уровня отдельных ферм к региональному масштабу в представленной каузальной петлевой диаграмме осуществляется через узел «межферменная агрегация данных». В этом узле происходит качественный сдвиг от локальных интеллектуальных систем к распределенной социально-трудовой системе агропромышленного комплекса региона. Межферменная агрегация данных предполагает объединение потоков информации, формируемых на отдельных хозяйствах, в единый региональный контур сведений и решений. В модели этот процесс не является автоматическим следствием цифровизации, а опосредован переменными «готовность к интеграции/обмен данными» и «доверие к ИИ и цифровым решениям». Тем самым подчеркивается социально-институциональная природа регионального ИИ-контура: его формирование требует не только технической совместимости систем, но и согласованных норм, стандартов и управленческих практик. Рост экономического эффекта ИИ на отдельных фермах усиливает доверие к цифровым решениям, что в свою очередь, повышает готовность к межферменному обмену данными. Это формирует усиливающую петлю (R^+), в рамках которой локальные успехи отдельных хозяйств масштабируются до уровня региона. При этом доверие выступает не как субъективная категория, а как системный ресурс, обеспечивающий устойчивость кооперативных цифровых практик.

Формирование «регионального контура данных и решений» представляет собой ключевой результат межферменной агрегации. В отличие от внутриферменных систем ИИ, региональный контур обладает иными свойствами: он оперирует более широкими выборками сведений, отражающих разнообразие природно-климатических, технологических и организационных условий. Это позволяет повышать обобщающую способность моделей ИИ и снижать риск переобучения на локальные особенности отдельных хозяйств.

В *CLD* рост качества региональных решений напрямую связан с экономическим эффектом региона. Последний понимается не только как сумма экономических эффектов отдельных ферм, но и как системное повышение устойчивости и конкурентоспособности регионального животноводства. Региональный экономический эффект стимулирует инвестиции в региональный ИИ, замыкая еще одну усиливающую петлю роста. Региональный уровень системы формирует собственный контур воспроизводства,

который не сводится к механическому масштабированию микроуровня. Он обладает относительной автономией и начинает влиять на отдельные фермы, в том числе через стандарты данных, рекомендации и нормативные практики. Наличие обратной связи от регионального уровня к уровню отдельных хозяйств. Инвестиции в региональный ИИ и развитие регионального контура информации повышают качество межферменной агрегации, что косвенно влияет на уровень внедрения ИИ на конкретных фермах. Это проявляется через доступ к более совершенным моделям, аналитическим сервисам и инфраструктурным решениям, которые отдельные хозяйства не могли бы создать самостоятельно. Региональный контур выступает как коллективный «когнитивный слой», снижающий барьеры входа для ферм-последователей. Это имеет вес влияния на другие фермы, учитывая отраслевую структуру животноводства, где большинство хозяйств относятся к группе поздних последователей и ориентируются на доказанную эффективность решений.

На региональном уровне роль ферм-экспериментаторов трансформируется. Если на микроуровне они выступают источником первичных данных и практик, то на мезоуровне они становятся узлами трансляции и стандартизации знаний. Их участие в региональных контурах данных повышает легитимность ИИ-решений и ускоряет распространение инноваций среди последователей. В модели это проявляется через усиление связей между уровнем внедрения ИИ на фермах-экспериментаторах и готовностью к межферменной интеграции. Экспериментаторы фактически выполняют функцию институциональных посредников между технологическим развитием и массовым внедрением. Хотя в представленной *CLD* доминируют усиливающие петли (R^+), на региональном уровне начинают проявляться потенциальные балансирующие механизмы. К ним относятся институциональные ограничения, неравномерность инфраструктурного развития, различия в цифровой зрелости хозяйств и риски концентрации данных. В текущей версии схемы эти ограничения зафиксированы имплицитно, однако они задают направления для дальнейшего развития модели. В частности, они подводят к необходимости включения энергетического и инфраструктурного контура региона, а также связи с внешними рынками – аспектам, которые позволяют перейти от эндогенной модели роста к более реалистичному представлению социально-экономической динамики.

Завершающий этап интерпретации представленной каузальной петлевой диаграммы – включение

внешних по отношению к аграрному производству контуров: энергетического, инфраструктурного и рыночного. Их введение дополняет модель, что переводит ее от исключительной эндогенности к отражению реальных ограничений и условий масштабирования ИИ в животноводстве на региональном уровне. Интеграция ИИ в социально-трудовую систему животноводства неизбежно приводит к росту энергопотребления и требований к цифровой инфраструктуре. Это связано как с увеличением объемов данных, так и с усложнением моделей, используемых для обучения и применения ИИ. На региональном уровне энергетический контур становится не фоновым условием, а активным фактором, способным как поддерживать, так и ограничивать усиливающие петли роста. Рост межферменной агрегации данных и развитие регионального ИИ-контура ведут к увеличению вычислительных нагрузок, что повышает потребность в устойчивом энергоснабжении, центрах обработки данных, сетевой связности и кадровых компетенциях. При достаточном уровне развития инфраструктуры этот контур усиливает региональный экономический эффект, так как дает возможность снижать удельные издержки на вычисления и повышать доступность ИИ-сервисов для ферм-последователей. В то же время при дефиците энергетических и инфраструктурных ресурсов формируется балансирующая петля (B), ограничивающая темпы внедрения ИИ. Это особенно актуально для сельских регионов, где энергетическая и цифровая инфраструктура часто служит узким местом. Таким образом, энергетический контур в модели выполняет двойственную функцию: он одновременно выступает условием роста и источником структурных ограничений.

Рынок в указанной модели представляется не только как механизм ценообразования, но и как институциональный фильтр. Рост цен на продукцию более высокого качества усиливает экономическую эффективность ферм и региона в целом, что стимулирует инвестиции в ИИ и инфраструктуру. Одновременно требования экспортных рынков к данным повышают ценность региональных контуров сведений и решений. Так, рынок формирует еще одну усиливающую петлю ($R+$), связывающую качество данных, качество решений и экономический эффект. Однако при этом он может выступать и источником балансирующих воздействий, если требования превышают текущие институциональные и технологические возможности региона.

ИИ в описанной модели не заменяет человека как субъекта деятельности, а перераспределяет функ-

ции мышления в биомашсистеме. Это проявляется в снижении когнитивной нагрузки, росте стадийности и усложнении производственного контура при сохранении управляемости системы [14]. Тем самым формируется человеко-центричная автоматизация, характерная для пятой промышленной революции.

Несмотря на традиционный характер сельскохозяйственной отрасли, внедрение инновационных технологий в животноводстве происходит медленно и часто сопровождается институциональным и поведенческим сопротивлением. Специфика отрасли заключается в высокой сложности объекта управления: биологические процессы, длительные производственные циклы, высокая вариативность условий и жесткие ресурсные ограничения. В этих условиях внедрение отдельных технологических решений на уровне одной фермы может повышать локальную эффективность, но само по себе не формирует масштабного экономического эффекта. Для его возникновения необходимо рассматривать взаимосвязанное внедрение автоматизации и интеллектуальных систем в региональном масштабе. По мере усложнения условий ведения животноводства в регионе возрастает количество используемых технических и управленческих средств, что порождает парадокс эффективности: увеличение числа машин и систем не гарантирует повышения результативности без механизмов их координации. Именно поэтому в текущем исследовании рынок рассматривается не как внешняя среда обмена, а как продолжение удлиненной производственной структуры, в которой реализуются эффекты инвестиций в капитальные блага, данные и интеллектуальные системы.

Ранее построенные каузальные петлевые диаграммы позволили выявить усиливающие и балансирующие контуры, описывающие переход от локального эффекта внедрения ИИ на уровне отдельных хозяйств к региональному эффекту. Но эти контуры не объясняют механизм трансформации накопленного производственного и когнитивного потенциала в рыночную стоимость продукции, капитализацию хозяйств и устойчивость регионального агропромышленного комплекса. Для анализа этого перехода используется методологическая рамка австрийской теории капитала, в которой рынок трактуется как завершающая стадия многостадийного производственного процесса, а не как момент обмена. На региональном уровне стадийность животноводческого производства анализируется с использованием нормированных единиц капитала, при этом рынок интерпретируется как пространство проверки удлиненной производственной структу-

ры через систему цен, стандартов и требований со стороны переработчиков и потребителей.

В рамках исследования не ставится задача построения моделей равновесных цен или оценки эластичностей спроса. Основное внимание уделяется выявлению механизма, посредством которого инвестиции в ИИ, данные и управляемость процессов трансформируются в устойчивый рыночный эффект. Рассматривается не увеличение физического объема производства, а изменение качественных характеристик продукции, степени ее дифференциации и способности включаться в более протяженные рыночные цепочки. Отдельная животноводческая ферма, даже обладая высокой технологической оснащенностью, не формирует рынок. Рынок возникает только при наличии совокупности производителей, действующих в сопоставимых институциональных и технологических условиях, способных обеспечивать стабильное качество продукции, сопоставимость данных и предсказуемость поставок. Следовательно, рыночный эффект внедрения ИИ носит коллективный и надындивидуальный характер и служит продолжением региональных контуров данных и управленческих решений.

В логике австрийской теории капитала рынок представляет собой совокупность наиболее удаленных во времени и организации стадий производства, на которых происходит окончательная оценка ценности блага. Внедрение ИИ приводит не только к усложнению внутренних стадий производства, но и к трансформации рыночных стадий. Интеграция интеллектуальных систем в технологический, управленческий и мониторинговый контуры формирует новые свойства продукции: управляемое качество, воспроизводимость показателей, прослеживаемость происхождения и устойчивость параметров во времени. Эти свойства не увеличивают объем выпуска напрямую, но удлиняют рыночную часть производственного процесса за счет дополнительных стадий контроля, сертификации и дифференциации.

В результате капитал, вложенный в ИИ и данные, начинает функционировать аналогично капитальным благам более высоких порядков. Продукция животноводства перестает быть однородным товаром и приобретает характеристики, позволяющие включать ее в более сложные и протяженные рыночные цепочки. Например, молоко, произведенное с использованием систем интеллектуального мониторинга и анализа, может рассматриваться как благо более высокого порядка, поскольку его рыночная ценность определяется не только физическими свойствами, но и совокупностью предшествующих стадий контроля, прогнозирования и управления,

реализованных задолго до момента обмена. Рассмотрим в *таблице* стадийную структуру производства животноводческой продукции с применением новой производственной стадии – ИИ.

Таблица представляет собой концептуальную модель стадийной структуры производства животноводческой продукции, построенную в логике австрийской теории капитала и дополненную учетом внедрения ИИ, межферменной агрегации данных и региональной рыночной интеграции. Производственная структура разложена по порядкам благ от седьмого к первому, где более высокие порядки соответствуют стадиям, временно и организационно удаленным от конечного потребления. В качестве инструмента концептуального анализа используются нормированные условные единицы капитала (д. е.), которые не отражают конкретную денежную оценку активов, а применяются для сопоставления относительной «массы» капитала, закрепленного на различных стадиях производственного процесса, и для иллюстрации его перераспределения во времени.

Седьмой порядок благ отражает формирование региональной инфраструктуры данных и интеллектуальных систем, которое возникает исключительно в условиях межферменной координации и не может быть создано на уровне отдельного хозяйства. В нормированных единицах капитала эта стадия фиксируется как самостоятельный прирост, поскольку до внедрения региональной цифровой инфраструктуры соответствующая стадия фактически отсутствует. Капитал на этом уровне выражается не в отдельных технических устройствах, а в совокупности вычислительных мощностей, энергетической инфраструктуры, стандартов данных и институциональных механизмов координации. Примером служит региональная платформа, агрегирующая сведения о продуктивности, здоровье животных и качестве молока с десятков ферм, что требует многолетнего периода внедрения (7-10 лет) и характеризуется повышенной нормой прибыли, компенсирующей высокий уровень неопределенности и стратегический характер инвестиций.

Шестой порядок благ представлен биологическим капиталом животноводческих хозяйств. В этой стадии первичные средства производства – поголовье, кормовая база, земля и условия содержания – количественно не увеличиваются, однако их производственная отдача возрастает за счет интеллектуального управления. В нормированных единицах капитала это выражается в приращении посредством повышения эффективности уже существующих активов. Например, внедрение ИИ-систем ранней диагности-

ки заболеваний или точного кормления позволяет снизить потери продуктивности и увеличить жизненный цикл животных. Временной лаг указанной стадии составляет 5-7 лет, что соответствует биологическим циклам воспроизводства стада, а норма прибыли отражает более высокий риск и временную удаленность результата.

Пятый порядок благ отражает технологический контур производства, включающий оборудование, сенсорные системы и интеллектуальные модули управления. Прирост капитала на этом уровне в д. е. связан не столько с увеличением количества оборудования, сколько с ростом его функциональной насыщенности. Примером может служить модернизация доильного зала путем интеграции потоковых анализаторов качества молока и систем автоматической калибровки, что увеличивает капиталоемкость этой стадии и удлиняет срок окупаемости до 4-6 лет или систем оценки экстерьера животных. Норма прибыли здесь несколько ниже, чем на биологической стадии, однако остается выше средней по отрасли за счет высокой роли технологий в формировании

будущей производительности.

Четвертый порядок благ соответствует управленческому контуру, где данные трансформируются в решения. В нормированных единицах капитала эта стадия отражает накопление управленческого и когнитивного капитала, который ранее частично компенсировался ручным трудом и опытом специалистов. Примером служит внедрение систем поддержки принятия решений, автоматически формирующих рекомендации по кормлению, лечению или выбраковке животных. Средний временной лаг этой стадии составляет 2-4 года, а прирост капитала проявляется в снижении транзакционных издержек, уменьшении ошибок и высвобождении оборотных ресурсов, ранее направляемых на устранение последствий управленческой неопределенности.

Третий порядок благ отражает стадию выпуска продукции с управляемыми и воспроизводимыми характеристиками качества. В базовой модели животноводческая продукция рассматривается как однородный товар, однако внедрение ИИ и региональных стандартов переводит ее в категорию диф-

Table		Таблица						
Стадийная структура производства животноводческой продукции с применением новой производственной стадии – ИИ / Stage structure of livestock production using a new production stage – AI								
Порядок блага	Стадия производственной структуры	Основное содержание стадии	Первичные средства производства/базовые ресурсы	Капитал без ИИ, д. е.	Капитал с ИИ и региональной интеграцией, д. е.	Прирост капитала, д. е.	Средний временной лаг до реализации	Средняя норма прибыли, % годовых
Седьмой	Региональная инфраструктура данных и ИИ	Межферменная агрегация данных, ИИ-модели, стандарты, прогнозирование	Энергия, вычислительная инфраструктура, институциональная среда	–	10	+10	7-10 лет	13-15
Шестой	Капитал в виде животных	Генетика, здоровье, кормление стада под управлением ИИ	Земля, поголовье, корма, вода	25	30	+5	5-7 лет	12-14
Пятый	Технологический контур	Оборудование, сенсоры, роботизированные и автоматизированные средства, интеллектуальные системы	Машины, здания, энергия	20	25	+5	4-6 лет	11-13
Четвертый	Управленческий контур	Аналитика, планирование, поддержка решений	Труд специалистов, данные	15	20	+5	2-4 года	10-12
Третий	Производственный выпуск	Молоко с управляемыми и воспроизводимыми характеристиками	Биологические процессы, текущие ресурсы	20	23	+3	1-2 года	9-11
Второй	Рыночная интеграция	Контракты, стандарты, экспортные и региональные цепочки	Логистика, институциональные каналы	15	18	+3	0,5-1 год	8-10
Первый	Конечное благо	Животноводческая продукция	Потребительский рынок	5	6	+1	Немедленно	6-8
Итого				100	120	+20	–	–

ференцированного блага. В нормированных единицах капитала это выражается в дополнительном «утолщении» стадии, связанном с обеспечением стабильности параметров качества. Примером может быть молоко с гарантированным содержанием жира и белка, подтвержденным сведениями непрерывного мониторинга. Временной лаг реализации здесь составляет 1-2 года, а норма прибыли снижается по сравнению с дальними стадиями, отражая меньшую неопределенность и близость к рынку.

Второй порядок благ представляет собой стадию рыночной интеграции, включающую контрактные отношения, стандарты качества, логистические и экспортные каналы. Прирост капитала на этом уровне в д. е. отражает расширение рыночной глубины и устойчивости сбыта, а не краткосрочный рост цен. Примером служит формирование региональных контрактов на поставку молока определенного качества для переработчиков или экспортных рынков, что требует согласованности действий нескольких хозяйств. Средний временной лаг составляет от полугода до одного года, а норма прибыли стабилизируется на более низком уровне, компенсируемом снижением рыночных рисков.

Первый порядок благ соответствует конечному потреблению, где реализуется дифференцированный продукт животноводства. В нормированных единицах капитала прирост здесь минимален, поскольку эта стадия не аккумулирует значительный капитал, а служит точкой окончательной оценки всей производственной структуры. Примером может быть премиальный продукт с подтвержденным происхождением, где добавленная стоимость формируется за счет всей предшествующей цепочки. Снижение нормы прибыли по мере приближения к конечному потребителю отражает классическое положение австрийской теории капитала о перераспределении доходности во времени и компенсации риска на более ранних стадиях производства.

Временное измерение, представленное в *таблице*, подчеркивает, что внедрение ИИ приводит к удлинению производственного процесса во времени и смещению инвестиционной активности в более дальние стадии с горизонтом реализации от нескольких лет до десятилетия. Совокупный прирост капитала в размере 20 нормированных единиц интерпретируется как структурный эффект удлинения и усложнения производственной структуры, а не как результат прямого увеличения объема выпуска или краткосрочной экономии издержек. Тем самым *таблица* демонстрирует, каким образом инвестиции в ИИ и данные трансформируются в долгосрочную капитализацию

регионального животноводческого комплекса.

Рассмотрели количественные параметры формирования потоков данных и связанного с ними энергопотребления на региональном уровне. Такой подход позволяет интерпретировать дальние стадии производственного процесса не только как абстрактные уровни капитала, но и как реальные инфраструктурные контуры, требующие материальных ресурсов и долгосрочных инвестиций.

В рамках исследования ввели допущение, что в среднем от одной коровы в сутки формируется порядка 2,5 МБ данных. Этот объем определила исследовательская группа авторов на основании разработанного оборудования и опыта работы с системами в животноводстве. Объем включает телеметрические сведения сенсоров активности и физиологического состояния животных; информацию, поступающую от доильных установок; показатели качества молока; данные о кормлении и ветеринарных процедурах и прочее. Принятая величина соответствует современному уровню цифровизации животноводческих ферм и не предполагает использования высокоплотных видеоданных, что дает возможность рассматривать ее как консервативную оценку. Для иллюстрации регионального масштаба приняли модель региона с поголовьем порядка 200 тыс. дойных коров. В этом случае совокупный объем первичных данных, формируемых ежедневно, составляет около 500 ГБ, а годовой объем данных достигает приблизительно 182,5 ТБ. С учетом требований к резервному копированию, репликации и накоплению исторических данных для обучения и валидации моделей машинного обучения, фактический объем хранимой информации на уровне региональной инфраструктуры может достигать 400-550 ТБ в горизонте нескольких лет. Указанный объем соответствует возможностям среднего регионального центра обработки данных и не выходит за рамки экономически обоснованных капитальных вложений.

Основная нагрузка на инфраструктуру связана не столько с хранением сведений, сколько с их обработкой и использованием в интеллектуальных системах поддержки принятия решений. При допущении пакетного обучения моделей и квазиреального времени обработки потоков данных, вычислительная инфраструктура регионального уровня может быть представлена кластером из 50-100 серверов с применением современных процессоров и специализированных ускорителей. Совокупная установленная мощность такого кластера оценивается в диапазоне 150-300 кВт. Годовое энергопотребление региональной вычислительной инфраструктуры при средней

нагрузке порядка 200 кВт составляет около 1,7-1,8 ГВт·ч. Даже при расширении системы и увеличении обрабатываемого поголовья до 300-350 тыс. коров энергопотребление по оценке не превысит 2-3 ГВт·ч в год, что сопоставимо с энергозатратами среднего промышленного предприятия и не формирует критического ограничения для региональной энергетической системы.

Однако внедрение ИИ одновременно приводит к снижению энергопотребления на более близких к биологическому процессу стадиях производства. В первую очередь энергетический эффект проявляется из-за оптимизации кормления и микроклимата. Применение интеллектуальных систем позволяет сократить перерасход кормов и связанных с ним энергетических затрат на их производство, транспортировку и раздачу. Даже снижение удельного потребления кормов на 2-3% при поголовье в сотни тысяч животных эквивалентно значительной экономии энергии, превосходящей энергозатраты на обработку данных. Аналогичный эффект наблюдается при управлении микроклиматом животноводческих помещений, где автоматическая регулировка вентиляции, отопления и охлаждения снижает пиковые нагрузки и общее энергопотребление. Дополнительный вклад в энергетический баланс вносит снижение внеплановых операций, связанных с заболеваниями и нарушениями производственного цикла. Ранняя диагностика заболеваний и отклонений в физиологическом состоянии животных уменьшает потребность в экстренных ветеринарных вмешательствах, транспортных операциях и дополнительных технологических процессах, каждый из которых сопровождается прямыми и косвенными энергозатратами. Таким образом, ИИ снижает не только экономические, но и энергетические потери, возникающие вследствие неопределенности биологических процессов. Системный эффект проявляется и на уровне технологического обслуживания оборудования. Прогнозирование отказов и оптимизация графиков обслуживания дают возможность сократить энергозатраты, связанные с аварийными остановками, переработкой продукции и неэффективным режимом работы машин. В результате происходит перераспределение энергопотребления от хаотичных и пиковых нагрузок к более ровному и предсказуемому профилю, что имеет значение как для отдельных хозяйств, так и для региональной энергетической системы.

Выводы. Интеграция ИИ в животноводство становится основой перехода к пятой промышленной революции в агропромышленном комплексе. ИИ не просто автоматизирует отдельные процессы, а

формирует новую организационную структуру, где технологии становятся частью системы принятия решений, координации труда и управления знаниями.

Внедрение ИИ приводит к удлинению и усложнению производственной структуры. Это выражается в появлении новых стадий – от сбора и агрегации данных до интеллектуального управления биологическими процессами и формирования региональных цифровых контуров. Такой подход обеспечивает переход от экстенсивного к интенсивному развитию отрасли, где основным источником экономического эффекта становятся управляемость и качество, а не только объем производства.

Региональная интеграция сведений и ИИ формируют самостоятельный контур, который не сводится к сумме эффектов отдельных хозяйств. Межферменная агрегация данных, создание региональных платформ и стандартов позволяют повысить обобщающую способность моделей, снизить риски переобучения и обеспечить устойчивый экономический эффект на уровне региона.

ИИ перераспределяет когнитивный труд, снижая нагрузку на человека и позволяя управлять более сложными системами без потери эффективности. Это отличает современную автоматизацию от предыдущих этапов, где основным эффектом заключался в вытеснении человеческого труда.

Энергетические и инфраструктурные требования к внедрению ИИ на региональном уровне значимы, но не служат критическим ограничением. При этом ИИ способствует снижению энергопотребления на биологических стадиях за счет оптимизации кормления, микроклимата и профилактики заболеваний, что в совокупности дает положительный энергетический баланс.

Рыночный эффект внедрения ИИ носит коллективный характер. Рынок становится продолжением удлинённой производственной структуры, где ценность продукции определяется не только физическими свойствами, но и всей цепочкой контроля, прогнозирования и управления, реализованной на предыдущих стадиях.

Инвестиции в ИИ и данные трансформируются в долгосрочную капитализацию регионального животноводческого комплекса, формируя мультипликативный эффект и повышая устойчивость отрасли к внешним и внутренним вызовам.

Таким образом, внедрение технологий ИИ в животноводстве – это не просто цифровизация отдельных процессов, а системная трансформация, обеспечивающая переход к устойчивому, человекоцентричному и интеллектуально управляемому агропромышлен-

ному производству на региональном уровне.

Библиографический список

1. Ценч Ю.С. Научно-технический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13. EDN: WLFWZG.
2. Иванов Ю.А., Сидорова В.Ю., Петров Е.Б. Использование сенсорных моделей для решения инженерных задач в животноводстве // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67. N1(38). С. 156-162. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-1-156-162. EDN: CJSJNI.
3. Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Баишева Р.А. и др. Искусственный интеллект в управлении животноводческой фермой // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28. N1. С. 16-25. DOI: 10.26897/2687-1149-2026-1-16-25. EDN: GFVRLQ.
4. Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 536-538. DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538. EDN: UKKACW.
5. Лобачевский Я.П. Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации // *Вестник Российской академии наук*. 2024. Т. 94. N3. С. 275-282. DOI: 10.31857/S0869587324030102. EDN: GFXGCD.
6. Петров Е.Б. Информационные технологии в управлении племенными ресурсами в животноводстве // *Техника и оборудование для села*. 2023. N10(316). С. 35-37. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-10-35-37. EDN: PQSOMV.
7. Симонов К.В., Гирфанова Н.А. Коммерциализация высокотехнологичного стартапа в России: система видеоаналитики для птицеводства // *Инновации*. 2022. N1(279). С. 20-31. DOI: 10.26310/2071-3010.2022.279.1.003. EDN: BSZOYD.
8. Ширманова Г.С., Неверов Е.Н., Николаева Е.В. и др. Обзор методов машинного обучения и компьютерного зрения в технологии инкубации яиц сельскохозяйственных птиц // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2024. N4(68). С. 92-99. DOI: 10.35694/YARCX.2024.68.4.014. EDN: SRLWTK.
9. Дадоян Е.Д. Особенности использования цифровых технологий в овцеводстве и козоводстве // *Управление рисками в АПК*. 2024. NS3(53). С. 278-282. EDN: BGSNOX.
10. Миронцов О.В., Корниенко П.П. Об использовании ресурсов цифровизации и искусственного интеллекта в овцеводстве // *Актуальные вопросы сельскохозяйственной биологии*. 2024. N4(34). С. 73-76. EDN: YBLKQB.
11. Silva Salas M.Á., Mondragón-Ancelmo Ja., Jiménez Badillo M.D.R. et al. Assessing dairy goat welfare in intensive or semi-intensive farming conditions in Mexico. *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104. Iss. 5. 6175-6184. DOI: 10.3168/jds.2020-19557. EDN: ORRXND.
12. Manzoor S., Syed Z., Abubabakar M. Global perspectives of intensive animal farming and its applications. *Intensive Animal Farming*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.112271.
13. Banhazi T.M., Lehr H., Black J.L. et al. Precision livestock farming: an international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2012. Vol. 5. Iss. 3. DOI: 10.3965/j.ijabe.20120503.001.
14. Черноиванов В.И. Сложная структура человеческого фактора в биомашсистемах // *Биомашсистемы*. 2018. Т. 2. N4. С. 7-21. EDN: RHMBRZ.

References

1. Tsench Yu.S. Scientific and technological potential as the main factor for agricultural mechanization development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13. EDN: WLFWZG.
2. Ivanov Yu.A., Sidorova V.Yu., Petrov E.B. The use of sensor models for solving engineering problems in livestock. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2020. Vol. 67. N1(38). 156-162 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-1-156-162. EDN: CJSJNI.
3. Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Baisheva R.A. et al. Use of artificial intelligence for managing a livestock farm. *Agricultural Engineering*. 2026. Vol. 28. N1. 16-25 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2026-1-16-25. EDN: GFVRLQ.
4. Izmailov A.Y. Intelligent technologies and robotic means in agricultural production. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 89. N5. 536-538 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538. EDN: UKKACW.
5. Lobachevsky Ya.P. Scientific support of priority technologies agro-industrial complex of the Russian Federation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2024. Vol. 94. N3. 275-282 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869587324030102. EDN: GFXGCD.
6. Petrov E.B. Information technologies in management of breeding resources in livestock farming. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N10(316). 35-37 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-10-35-37. EDN: PQSOMV.

7. Simonov K.V., Girfanova N.A. Commercialization of high-tech startup in Russia: video analytics system for poultry farming. *Innovations*. 2022. N1(279). 20-31 (In Russian). DOI: 10.26310/2071-3010.2022.279.1.003. EDN: BSZOYD.
 8. Shirmanova G.S., Neverov E.N., Nikolaeva E.V. et al. A review of machine learning and computer vision methods in poultry egg incubation technology. *Agro-industrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2024. N4(68). 92-99 (In Russian). DOI: 10.35694/YARCX.2024.68.4.014. EDN: SRLWTK.
 9. Dadoyan E.D. Features of the use of digital technologies in sheep and goat breeding. *Agricultural Risk Management*. 2024. NS3(53). 278-282 (In Russian). EDN: BGSNOX.
 10. Mirontsov O.V., Kornienko P.P. On the use of digitalization and artificial intelligence resources in sheep breeding. *Actual Issues in Agricultural Biology*. 2024. N4(34). 73-76 (In Russian). EDN: YBLKQB.
 11. Silva Salas M.Á., Mondragón-Ancelmo Ja., Jiménez Badillo M.D.R. et al. Assessing dairy goat welfare in intensive or semi-intensive farming conditions in Mexico. *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104. Iss. 5. 6175-6184. DOI: 10.3168/jds.2020-19557. EDN: ORRXND.
 12. Manzoor S., Syed Z., Abubabakar M. Global perspectives of intensive animal farming and its applications. *Intensive Animal Farming*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.112271.
 13. Banhazi T.M., Lehr H., Black J.L. et al. Precision livestock farming: an international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2012. Vol. 5. Iss. 3. DOI: 10.3965/j.ijabe.20120503.001.
 14. Chernoiyanov V.I. Complex structure of the human factor in biomashsystems. *Biomashsystems*. 2018. Vol. 2. N4. 7-21 (In Russian). EDN: RHMBRZ.
- Павкин Д.Ю. – анализ полученных данных, об-суждение материалов;
Юрочка С.С. – литературный анализ, обработка результатов исследования, формирование текста и общих выводов.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Mamontova T.V. – analysis of the obtained data and development of recommendations, critical analysis and revision of the text;

Dorokhov A.S. – scientific supervision, participation in formulating the research concept;

Kirsanov V.V. – critical analysis, participation in formulating the research concept;

Pavkin D.Yu. – analysis of the obtained data, discussion of the materials;

Yurochka S.S. – literary analysis, processing of the research results, writing the text and overall conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.04.2026

Статья принята к публикации 18.06.2026

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Мамонтова Т.В. – анализ полученных данных и разработка рекомендаций, критический анализ и разработка текста;

Дорохов А.С. – научное руководство, участие в формулировании концепции исследования;

Кирсанов В.В. – критический анализ, участие в формулировании концепции исследования;



Разработка программно-аппаратного комплекса для определения передаточной функции преобразователя частоты

Никита Андреевич Левченко,

ассистент, e-mail: nikitalevchenko46@gmail.com;

Сергей Сергеевич Ястребов,

кандидат физико-математических наук, доцент;

Андрей Иванович Адошев,

кандидат технических наук, доцент;

Геннадий Юрьевич Колесников,

кандидат технических наук, доцент

Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация

Настоящая статья подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-591) в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ, утвержденной протоколом заседания президиума Комиссии по научно-технологическому развитию Российской Федерации от 29.05.2025 № 3.

Реферат. В современных системах электропривода в промышленности и сельском хозяйстве для осуществления технологического процесса широко применяется частотное скалярное и векторное управление асинхронным электродвигателем при помощи преобразователя частоты. Для поддержания заданных параметров технологического процесса используются различные системы автоматического управления и регуляторы. Построение системы управления основывается на технологических требованиях и условиях работы механизма, по которым составляется ее математическая модель, в структуре которой каждый элемент представлен в виде звена со своей передаточной функцией. (Цель исследования) Разработать и реализовать методику для определения передаточной функции преобразователя частоты. (Материалы и методы) Использовали для определения передаточной функции преобразователя частоты спектральное «изображение» переходного процесса преобразователя частоты совместно с асинхронным электродвигателем, получаемое по результатам физического моделирования. Показали, что спектральное «изображение» переходного процесса создавали с использованием быстрого преобразования Фурье с «движущимся» прямоугольным окном, реализованное на языке программирования Python с применением программных библиотек NumPy, Matplotlib. Сравнили спектральное «изображение» переходного процесса преобразователя частоты с искусственно созданным «изображением» переходного процесса для звена с известной передаточной функцией. Провели сравнение по евклидовому расстоянию и расстоянию Хэмминга. (Результаты и обсуждение) Применили разработанную методику к преобразователю частоты, при этом выявили время начала переходного процесса по входному аналоговому сигналу. Приняли размер «движущегося» прямоугольного окна как один период минимальной частоты выходного напряжения преобразователя частоты. Установили в результате применения методики передаточную функцию преобразователя частоты как апериодическое звено 1-го порядка с задержкой. (Выводы) Констатировали, что разработанная методика позволяет определять передаточную функцию преобразователя частоты в частотной области при его представлении звеном с практически любой передаточной функцией.

Ключевые слова: преобразователь частоты, передаточная функция, переходный процесс, комплексное быстрое преобразование Фурье, гармонические составляющие.

Для цитирования: Левченко Н.А., Ястребов С.С., Адошев А.И., Колесников Г.Ю. Разработка программно-аппаратного комплекса для определения передаточной функции преобразователя частоты // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 93-99. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-93-99. EDN: TVEJVT.

Scientific article

Development of a Hardware and Software Complex for Determining the Transfer Function of a Frequency Converter

Nikita A. Levchenko,

assistant, e-mail: nikitalevchenko46@gmail.com;

Sergey S. Yastrebov,

Ph.D.(Phys.-Math.), associate professor;

Andrey I. Adoshev,

Ph.D.(Eng.), associate professor;

Gennadiy Yu. Kolesnikov,

Ph.D.(Eng.), associate professor

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russian Federation

This article was prepared with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2025-591) as part of the implementation of the world-class Agroengineering of the Future Scientific center development program at Stavropol State Agrarian University, approved by the minutes of the meeting of the Presidium of the Commission for Scientific and Technological Development of the Russian Federation dated 05/29/2025 No. 3.

Abstract. *In modern electric drive systems in industry and agriculture, frequency scalar and vector control of an asynchronous electric motor using a frequency converter is widely used to implement the technological process. To maintain the set parameters of the technological process, various automatic control systems and regulators are used. The construction of the control system is based on the technological requirements and operating conditions of the mechanism, according to which its mathematical model is compiled, in the structure of which each element is represented as a link with its own transfer function. (Research purpose) The research purpose is developing and implementing a methodology for determining the transfer function of a frequency converter. (Materials and methods) Used to determine the transfer function of the frequency converter, a spectral «image» of the transient process of the frequency converter together with an asynchronous electric motor obtained from the results of physical modeling. It was shown that the spectral «image» of the transient process was created using a fast Fourier transform with a «moving» rectangular window, implemented in the Python programming language using the NumPy and Matplotlib software libraries. The spectral «image» of the transient process of the frequency converter was compared with an artificially created «image» of the transient process for a link with a known transfer function. Make a comparison of the Euclidean distance and the Hamming distance. (Results and discussion) We applied the developed technique to the frequency converter, while revealing the start time of the transient process using the input analog signal. The size of the «moving» rectangular window was taken as one period of the minimum frequency of the output voltage of the frequency converter. It was found as a result of the application of the technique that the transfer function of the frequency converter was determined as an aperiodic link of the 1st order with a delay. (Conclusions) It was stated that the developed technique makes it possible to determine the transfer function of a frequency converter in the frequency domain when it is represented by a link with almost any transfer function.*

Keywords: *frequency converter, transfer function, transient, complex fast Fourier transform, harmonic components.*

For citation: Levchenko N.A., Yastrebov S.S., Adoshev A.I., Kolesnikov G.Yu. Development of a hardware and software complex for determining the transfer function of a frequency converter. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 93-99 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-93-99. EDN: TVEJVT.

На сегодняшний день в сельском хозяйстве и сфере АПК применяются различные системы автоматического управления (САУ) технологическими процессами и исполнительными механизмами. Для реализации системы автоматического управления применяются регуляторы, такие как пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД), причем данные регуляторы реализуются в современных преобразователях частоты (ПЧ). Настройка регуляторов осуществляется с использованием математической модели САУ, в которой все элементы электропривода представлены в виде звеньев, имеющих свою передаточную функцию [1, 2]. Передаточные функции большинства звеньев САУ заранее известны, а передаточная функция ПЧ во многих случаях устанавливается приблизительно [3, 4]. Внутренняя структура ПЧ достаточно сложная, поэтому целесообразно показать его в виде отдельного звена, обладающего определенной передаточной функцией.

Основная сложность установления передаточной функции заключается в том, что необходимо произвести анализ переходного процесса в частотной области ПЧ, то есть изменения частоты выходного напряжения при воздействии на его аналоговый вход возмущающего воздействия в виде ступенчатого изменения входного напряжения. Входными данными для разработанной методики служит массив мгновенных отсчетов токов и напряжений статора асинхронного электродвигателя (АД), подключенного к выходу ПЧ, и аналогового сигнала управления частотой ПЧ.

В общем методику определения передаточной функции ПЧ можно описать следующим образом. К выходному сигналу ПЧ применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ) с движущимся прямоугольным окном. Начало переходного процесса выявляли по изменению управляющего сигнала, окончание – по стабилизации спектра выходного сигнала ПЧ. По результатам анализа переходного процесса строили «изображение» спектра выходного сигнала в переходном процессе. Полученное «изображение» сравнивали с «изображением» спектра искусственно сгенерированного сигнала переходного процесса в соответствии с заданной передаточной функцией. Сравнение «изображений» реального и сгенерированного переходных процессов проводили с помощью евклидова расстояния или расстояния Хэмминга [5, 6]. По минимуму евклидова расстояния устанавливали передаточную функцию ПЧ.

Цель исследования – разработать и реализовать

методику для определения передаточной функции преобразователя частоты.

Материалы и методы. Схема экспериментальной установки описана в работе Levchenko N.A., Efانov A.V., Yastrebov S.S., Adoshev A.I. Transient process analysis for accurate frequency converter performance in Agro-Industrial Applications. Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Agriculture 4.0 and Precision Agriculture. 2025. Vol. 2. 62-69. DOI: 10.1007/978-3-031-98127-2_6. EDN: MOMNGW. В настоящем исследовании выполнили усовершенствование программного обеспечения (ПО) для определения передаточной функции ПЧ, учитывая современные тенденции ПО было реализовано на языке программирования *Python* с использованием программных библиотек *NumPy*, *Matplotlib* [7-11]. Массив мгновенных отсчетов формировали с помощью платы сбора данных (ЛА-1,5 PCI с частотой дискретизации 500 кГц, АЦП 12 бит). Частота дискретизации составила величину $f_s = 499\ 50$ Гц на канал, длительность записи – порядка 5-7 с. Всего регистрировали 7 каналов: межфазные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , линейные токи I_A , I_B , I_C , входное напряжение управления ПЧ $U_{вх}$. Электродвигатель работал в режиме холостого хода. Полученные данные обрабатывали с применением ПО, разработанного на языке программирования *Python*.

Основной алгоритм работы ПО можно описать следующим образом. На первом этапе определили начало переходного процесса, которое регистрируется с помощью анализа массива мгновенных отсчетов $U_{вх}$. Для этого на начальном участке (0-1 с) установили среднее значение входного сигнала, затем – номер отсчета, после которого среднее значение десяти последовательно идущих отсчетов увеличивалось на 10% относительно среднего значения входного сигнала на начальном участке. Номер данного отсчета принимался за начало переходного процесса (рис. 1).

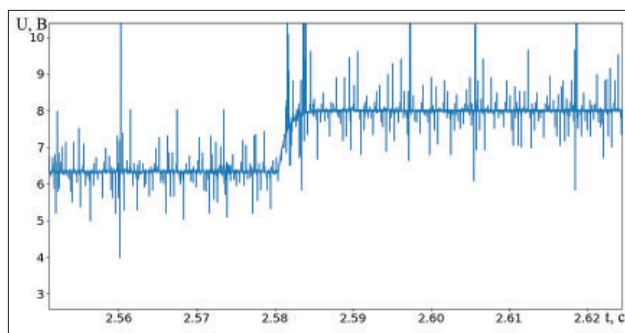


Рис. 1. Оциллограмма управляющего напряжения на входе преобразователя частоты

Fig. 1. Waveform of the control voltage at the input of the frequency converter

Далее по настройкам ПЧ определили минимальную и максимальную частоты выходного сигнала. Размер прямоугольного окна для БПФ установили, как длительность одного периода напряжения на выходе ПЧ при минимальной частоте f_{\min} . К выборке мгновенных значений напряжения величиной $N = f_s \cdot 1/f_{\min}$ применили БПФ с помощью функций, встроенных в библиотеку *Python NumPy*. Массив гармоник, получающихся в результате БПФ $y[k]$:

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-2\pi j \frac{kn}{N}} \cdot x[n], \quad (1)$$

где N – число мгновенных значений напряжения в выборке;

k – число гармонических составляющих в массиве результата БПФ;

$x[n]$ – массив мгновенных значений длиной N .

Следует отметить, что библиотека *Python NumPy* реализует комплексное БПФ, то есть может работать с массивом любого размера. Из полученного массива $y[k]$ для анализа использовали первые 100 гармоник. Движение окна осуществляли на фиксированный шаг 500 отсчетов ($\Delta t \approx 0,01$ с).

Начальное положение окна БПФ приняли за один период минимальной частоты выходного сигнала ПЧ до начала переходного процесса. Окончание переходного процесса регистрировали по стабилизации гармонического состава напряжения ПЧ. В разработанном ПО применили 100 шагов движения окна за время переходного процесса. В результате получился массив, в котором сохраняется модуль гармоник напряжения на выходе ПЧ размерностью 100×100 , который служит спектральным «изображением» переходного процесса.

Затем моделировали искусственный переходный процесс ПЧ с использованием заданной передаточной функции. От начала измерения и до момента возникновения переходного процесса и с учетом задержки t_z выходной сигнал ПЧ моделировали как синусоиду с постоянной амплитудой и частотой. После момента возникновения переходного процесса выходной сигнал ПЧ моделировали как синусоиду с изменяющейся амплитудой и частотой, закон изменения амплитуды и частоты определяется заданной передаточной функцией ПЧ, как аperiodического звена 1-го порядка с задержкой. Такое звено характеризуется постоянной времени T и временем задержки t_z . Коэффициент усиления $k_y = 5$ Гц/В для данной системы определили по соотношению $U_{\text{вх}}$ и частоты выходного сигнала ПЧ.

Изменение частоты происходит по заданной передаточной функции:

$$hf(t) = f_1 + (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \cdot (f_2 - f_1), \quad (2)$$

где f_1 – частота на выходе ПЧ до начала переходного процесса;

f_2 – частота на выходе ПЧ после окончания переходного процесса.

Изменение амплитуды напряжения происходит по заданной передаточной функции:

$$hu(t) = u_1 + (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \cdot (u_2 - u_1), \quad (3)$$

где u_1 – напряжение на выходе ПЧ до начала переходного процесса;

u_2 – напряжение на выходе ПЧ после окончания переходного процесса;

$$u(t) = hu(t) \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot hf(t)). \quad (4)$$

Массив мгновенных значений, полученный путем моделирования искусственного переходного процесса, имеет такую же размерность, как и экспериментально полученный массив, и подвергался таким же преобразованиям. В результате получился массив размерностью 100×100 , который служит «изображением» искусственного переходного процесса.

Для сравнения «изображений» реального и искусственного переходных процессов использовали метод сравнения по евклидовому расстоянию и расстоянию Хэмминга. Переходную функцию ПЧ определили по его минимуму.

Результаты и обсуждение. Разработанную методику применили для оценки передаточной функции ПЧ при проведении экспериментов для ПЧ *ONI A400 1Ф 1,5кВт 7,5А* с асинхронным двигателем *АИР 26А4* мощностью 120 Вт. При физическом моделировании получили отсчеты мгновенных значений междуфазного выходного напряжения $U_{\text{АВ}}$ и входного напряжения ПЧ $U_{\text{вх}}$. С помощью разработанного ПО определили время начала переходного процесса, равное 2,58 с. В этот момент напряжение на входе ПЧ изменялось от 6,4 до 8 В. Входные аналоговые цепи ПЧ вместе с делителем напряжения можно представить как *RC*-цепь с постоянной времени порядка 1 мс (*рис. 1*) [3]. Общая длительность переходного процесса составила порядка 0,6 с (*рис. 2*). Поэтому переходным процессом управляющего сигнала на входе ПЧ можно пренебречь.

Частота выходного напряжения ПЧ изменяется от 32 до 40 Гц, а линейное напряжение от 74 до 129 В.

На *рисунке 3* приведен гармонический состав выходного напряжения ПЧ в диапазоне 1-600 Гц. Как видно, до начала переходного процесса преимущественна частота 32 Гц (*рис. 3а*), в переходном процессе спектр напряжения изменяется (*рис. 3б*), какую-либо значимую величину имеют гармоники с нулевой по десятой. По окончании переходного процесса (*рис. 3с*) в составе спектра напряжений

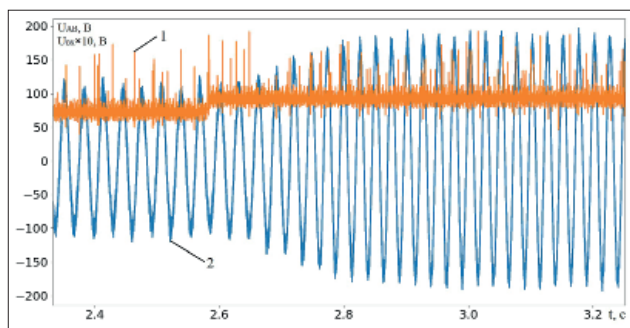


Рис. 2. Длительность переходного процесса преобразователя частоты: 1 – входное напряжение ПЧ; 2 – выходное напряжение ПЧ

Fig. 2. Duration of the frequency converter transition process: 1 – FC input voltage; 2 – FC output voltage

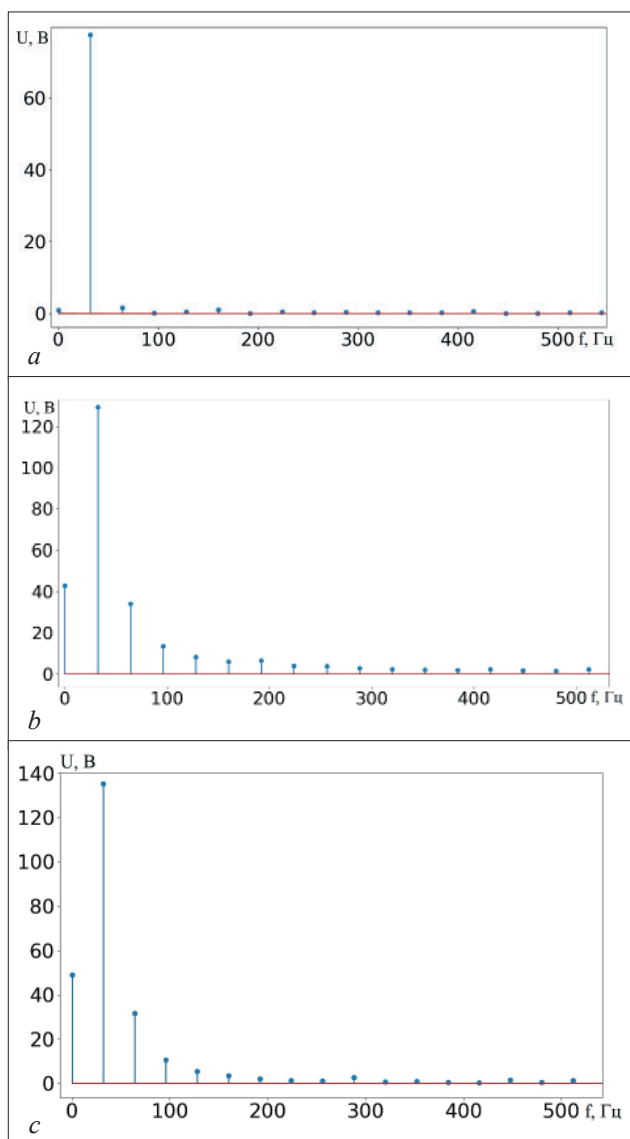


Рис. 3. Гармонический состав выходных напряжений: а – до переходного процесса; б – в середине переходного процесса; в – после окончания переходного процесса

Fig. 3. Harmonic composition of output voltages: a – before the transient; b – in the middle of the transient; c – after the end of the transient

существенное значение имеют гармоники с нулевой по четвертую. Присутствие нулевой и четных гармоник обусловлены тем, что размер окна БПФ не кратен периоду выходного напряжения ПЧ U_{AB} во время и после окончания переходного процесса. Необходимо отметить, что гармонический состав выходного напряжения может испытывать периодические колебания при движении окна БПФ, так как шаг его движения не кратен периоду напряжения на выходе ПЧ.

Моделирование искусственного переходного процесса провели при изменении двух параметров передаточной функции ПЧ – времени задержки t_3 и постоянной времени T . Результаты определения евклидова расстояния между «изображениями» реального и искусственного переходных процессов приведены в *таблице*. Для увеличения точности определения расстояния сравнили «изображения» не полностью, а лишь наиболее различимые их области (первые 10 гармоник, длительность переходного процесса 60 шагов или 0,6 с).

Особенность разработанной методики заключается в том, что изменение спектра U_{AB} не дает в прямом виде передаточную характеристику ПЧ. О виде передаточной характеристики можно судить по сравнению спектра выходного сигнала со спектром выходного сигнала, полученного в результате моделирования звена с известной передаточной функцией.

Из анализа данных, приведенных в *таблице*, можно сделать вывод, что наиболее подходящим будет апериодическое звено 1-го порядка с постоянной времени $T = 0,25$ с и задержкой $t_3 = 0,01$ с [12]. Если сравнить «изображения» с помощью расстояния Хэмминга, получим схожие результаты.

Выводы. Разработанная методика позволяет определять передаточную функцию ПЧ в частотной области, при этом она не ограничивается видом передаточной функции ПЧ – могут быть найдены передаточные функции ПЧ как звена 1-го порядка с задержкой или звена 2-го и более высокого порядка. Данная методика основана на сравнении спектрального «изображения» реального переходного процесса ПЧ в частотной области с искусственно созданным «изображением» переходного процесса для звена с заданной передаточной функцией. Сравнение «изображений» выполнили как с использованием евклидова расстояния, так и расстояния Хэмминга. Передаточную функцию установили по минимуму расстояния между «изображениями». Методику применили для ПЧ с АД, который при этом ПЧ представлялся как апериодическое звено 1-го порядка с задержкой. По мини-

Table

Таблица

Евклидовое расстояние между «изображениями» реального и искусственного переходных процессов
Euclidean distance between «images» of real and artificial transients

$T \backslash t_3$	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
0,01	0,324	0,246	0,324	0,226	0,217	0,241	0,254
0,05	0,309	0,239	0,309	0,226	0,214	0,234	0,247
0,1	0,288	0,220	0,288	0,223	0,215	0,237	0,251
0,15	0,257	0,206	0,257	0,233	0,226	0,258	0,269
0,2	0,227	0,199	0,227	0,232	0,227	0,264	0,275
0,25	0,195	0,218	0,196	0,253	0,251	0,282	0,295
0,3	0,213	0,264	0,213	0,295	0,290	0,310	0,320

муму евклидового расстояния между «изображениями» определили представление передаточной функции ПЧ со следующими параметрами: время задержки $t_3 = 0,01$ с, постоянная времени $T = 0,25$ с, коэффициент усиления $k_y = 5$ Гц/В.

Библиографический список

1. Abdullayev X.O. Algorithm for drawing up structured schemes of automatic control systems. *Web of Technology: Multidimensional Research Journal*. 2024. N2(11). 229-239.
2. Grigoriev A., Ahmedov B., Artemyev V. et al. Modelling of automatic control system on an electronic model. *Machine Science Journal*. 2024. Vol. 13. N2. 65-76. DOI: 10.61413/rsgz7710.
3. Афанасьева И.Г. Идентификация передаточных функций объектов с распределенными параметрами при расчете систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством // *В мире научных открытий*. 2015. N12-3(72). С. 752-766. EDN: VSSLOH.
4. Дервянчук Н.В. Определение передаточных функций элементов системы автоматического управления // *Общество*. 2024. N1-2(32). С. 38-41. EDN: GEHRPU.
5. Ташлинский А.Г., Сафина Г.Л., Коваленко Р.О. Оптимальное евклидово расстояние рассогласования оценок при псевдоградиентном оценивании параметров межкадровых геометрических деформаций изображений // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2018. Т. 16. N11. С. 33-39. DOI: 10.18127/j20700814-201811-06. EDN: YVOCYX.
6. Иванов А.И., Иванов А.П., Юнин А.П. Устранение методической погрешности оценки энтропии в пространстве расстояний Хэмминга // *Защита информации. Инсайд*. 2023. N6(114). С. 55-59. EDN: LOETSN.
7. Таршхоева Ж.Т. Язык программирования Python. Библиотеки Python // *Молодой ученый*. 2021. N5(347). С. 20-21. EDN: MBMUWL.
8. Жорняк А.Г., Морозова Т.А. Специализированный дистрибутив Python(X,Y) языка программирования Python для научных и инженерных вычислений // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022. N7. С. 39-42. EDN: LRWRFJ.
9. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020. Vol. 585. N7825. 357-362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. EDN: IVEXXC.
10. Бабинова Н.Н. Применение библиотеки NumPy для векторизации кода Python // *Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика*. 2023. N1(46). С. 14-29. DOI: 10.34130/1992-2752_2023_1_14. EDN: PCPQJO.
11. Hafeez A., Sial A.H. Comparative Analysis of Data Visualization Libraries Matplotlib and Seaborn in Python. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2021. Vol. 10. Iss. 1. 277-281. DOI: 10.30534/ijatcse/2021/391012021. EDN: QXINJK.
12. Брылина О.Г. Влияние закона широтно- и частотно-широотно-импульсной модуляции на уровень пульсаций выходного сигнала апериодического звена первого порядка // *Электротехника*. 2014. N10. С. 18-23. EDN: SOCXOD.

References

1. Abdullayev X.O. Algorithm for drawing up structured schemes of automatic control systems. *Web of Tech-*

- nology: *Multidimensional Research Journal*. 2024. N2(11). 229-239.
2. Grigoriev A., Ahmedov B., Artemyev V. et al. Modeling of automatic control system on an electronic model. *Machine Science Journal*. 2024. Vol. 13. N2. 65-76. DOI: 10.61413/rsgz7710.
 3. Afanasyeva I.G. Identification of the transfer function for objects with distributed parameters when calculating systems of automatic control with parallel corrective devices. *In the World of Scientific Discoveries*. 2015. N12-3(72). 752-766 (In Russian). EDN: VSSLOH.
 4. Derevyanchuk N.V. Determination of the transfer functions of the elements of the automatic control system. *Society*. 2024. N1-2(32). 38-41 (In Russian). EDN: GEHRPU.
 5. Tashlinskii A.G., Safina G.L., Kovalenko R.O. Optimal Euclidean distance of estimates mismatch at stochastic gradient estimation of image interframe geometric deformation parameters. *Information-measuring and Control Systems*. 2018. Vol. 16. N11. 33-39 (In Russian). DOI: 10.18127/j20700814-201811-06. EDN: YVOCYX.
 6. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Yunin A.P. Eliminating the methodological error of entropy estimation in the space of hamming distances. *Information protection. Inside*. 2023. N6(114). 55-59 (In Russian). EDN: LOETSN.
 7. Tarshkheeva J.T. The Python programming language. Python libraries. *Young Scientist*. 2021. N5(347). 20-21 (In Russian). EDN: MBMUWL.
 8. Zhorniyak A.G., Morozova T.A. Specialized Python (X,Y) distribution of the python programming language for scientific and engineering computing. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2022. N7. 39-42 (In Russian). EDN: LRWRFJ (In Russian).
 9. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020. Vol. 585. N7825. 357-362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. EDN: IVEXXC.
 10. Babikova N.N. Using NumPy to vectorization of Python code. *Bulletin of Syktyvkar University Series I: Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2023. N1(46). 14-29 (In Russian). DOI: 10.34130/1992-2752_2023_1_14. EDN: PCPQJO.
 11. Hafeez A., Sial A.H. Comparative Analysis of Data Visualization Libraries Matplotlib and Seaborn in Python. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2021. Vol. 10. Iss. 1. 277-281. DOI: 10.30534/ijatcse/2021/391012021. EDN: QXINJK.
 12. Brylina O.G. Influence of the pattern of pulse-width and frequency-pulse-width modulation on the ripple level of the output signal of the first-order aperiodic link. *Electrical Engineering*. 2014. N10. 18-23 (In Russian). EDN: SOCXOD.
- Конфликт интересов**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
- Conflict of interest**
The authors declare no conflict of interest.
- Заявленный вклад соавторов:**
Левченко Н.А. – проведение экспериментального исследования, литературный анализ и формулирование общих выводов, оформление материалов статьи;
Ястребов С.С. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, анализ и обобщение результатов исследования;
Адошев А.И. – участие в обсуждении материалов статьи, оформлении и доработке текста и общих выводов;
Колесников Г.Ю. – участие в обсуждении материалов статьи, оформлении и доработке текста и общих выводов.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
- Coauthors' contribution:**
Levchenko N.A. – conducting experimental research, literary analysis and the formation of general conclusions, design of the materials of the manuscript;
Yastrebov S.S. – scientific guidance, formulation of the main research directions, analysis and generalization of research result;
Adoshev A.I. – participation in the discussion of the materials of the manuscript, design and revision of the text and general conclusions;
Kolesnikov G.Yu. – participation in the discussion of the materials of the manuscript, design and revision of the text and general conclusions.
The authors read and approved the final manuscript.
- Статья поступила в редакцию 03.03.2026**
Статья принята к публикации 07.04.2026



Анализ применения гибридных систем возобновляемой энергетики для электроснабжения потребителей в сельской местности России

Сергей Иванович Белов,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: sbelov_@mail.ru;

Олег Валерьевич Лештаев,

кандидат технических наук, доцент

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Развитие сельского хозяйства в России невозможно без совершенствования систем энергоснабжения сельских потребителей. Одно из эффективных решений – использование распределенной генерации с участием возобновляемых источников энергии и, в первую очередь, солнечной генерации, которая в последнее время успешно развивается, особенно в сельской местности южных регионов России. За рубежом в сельской местности активно применяются гибридные системы возобновляемой энергетики, которые сочетают в себе несколько разных источников возобновляемой энергии, что позволяет повысить показатели надежности и экономичности энергоснабжения сельских потребителей электроэнергии. Внедрение и развитие управляемых микросетей с максимальным использованием местных природных ресурсов даст возможность обеспечить надежное и эффективное энергоснабжение потребителей в сельскохозяйственных регионах России. (Цель исследования) Изучить зарубежный опыт и научные исследования по развитию систем электроснабжения сельских потребителей с участием разнообразных источников возобновляемой энергии, оценить преимущества, проблемы и перспективы развития гибридных микросистем для использования этого опыта с целью развития распределенной возобновляемой энергетики в сельскохозяйственных регионах России. (Материалы и методы) Проанализировали литературные источники по внедрению гибридных микросистем возобновляемой энергетики в сельской местности, в том числе материалы Международного энергетического агентства (IEA), Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA) и Международного альянса по сельской электрификации (ARE). (Результаты и обсуждение) Установили, что электрификация сельских потребителей с применением гибридных систем возобновляемой энергетики и созданием управляемых микросетей позволяет обеспечить надежное и качественное электроснабжение сельскохозяйственных потребителей, включая домохозяйства, фермерские производства и сельские социальные и инфраструктурные организации. (Выводы) Показали, что успешное внедрение гибридной микрогенерации с возобновляемыми источниками энергии в России должно сопровождаться поддержкой государства в разнообразных формах: законодательной, финансовой, научно-технической, обучающей, просвещающей и прочими способами поддержки новой технологической платформы в системе энергообеспечения конечных потребителей в сельской местности.

Ключевые слова: распределенная возобновляемая энергия, микросеть, гибридные системы возобновляемой энергетики, система энергоменеджмента, сельские интеллектуальные электросети.

Для цитирования: Белов С.И., Лештаев О.В. Анализ применения гибридных систем возобновляемой энергетики для электроснабжения потребителей в сельской местности России // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 100-114. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-100-114. EDN: UKMISC.

Scientific article

Analysis of the use of hybrid renewable energy systems for power supply to consumers in rural areas of Russia

Sergey I. Belov,

Ph.D.(Eng.), associate professor, e-mail: sbelov_@mail.ru;

Oleg V. Leshtaev,
Ph.D.(Eng.), associate professor

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The development of agriculture in Russia is impossible without improving the energy supply systems of rural consumers. One of the effective solutions is the use of distributed generation with the participation of renewable energy sources and, first of all, solar generation, which has been successfully developing recently, especially in rural areas of the southern regions of Russia. Abroad, hybrid renewable energy systems are actively used in rural areas, which combine several different sources of renewable energy, which makes it possible to increase the reliability and efficiency of energy supply to rural electricity consumers. The introduction and development of controlled microgrids with the maximum use of local natural resources will make it possible to provide reliable and efficient energy supply to consumers in the agricultural regions of Russia. (Research purpose) The research purpose is studying foreign experience and scientific research on the development of power supply systems for rural consumers with the participation of various sources of renewable energy, assessing the advantages, problems and prospects for the development of hybrid microsystems to use this experience for the development of distributed renewable energy in agricultural regions of Russia. (Materials and methods) Analyzed literature sources on the introduction of hybrid microsystems of renewable energy in rural areas, including materials from the International Energy Agency (IEA), the International Renewable Energy Agency (IRENA) and the International Alliance for Rural Electrification (ARE). (Results and discussion) It has been found out that the electrification of rural consumers using hybrid renewable energy systems and the creation of controlled microgrids makes it possible to provide reliable and high-quality power supply to agricultural consumers, including households, farm production and rural social and infrastructure organizations. (Conclusions) It has been shown that the successful implementation of hybrid microgeneration with renewable energy sources in Russia should be accompanied by state support in various forms: legislative, financial, scientific and technical, educational, enlightening and other ways to support a new technological platform in the energy supply system of end-users in rural areas.*

Keywords: *distributed renewable energy, microgrid, hybrid renewable energy systems, energy management system, rural smart grids.*

For citation: Belov S.I., Leshtaev O.V. Analysis of the use of hybrid renewable energy systems for power supply to consumers in rural areas of Russia. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 100-114 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-100-114. EDN: UKMISC

Эффективное развитие отраслей сельского хозяйства в России невозможно без комплексной модернизации систем энергоснабжения сельских потребителей для повышения надежности, экономичности и качества электроснабжения сельскохозяйственных производств, фермерских хозяйств и сельского населения путем внедрения децентрализованных решений локального производства электрической энергии с участием разнообразных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и, в первую очередь, солнечной генерации. В сельской местности, в отличие от городской, имеется широкая возможность в дополнение к солнечной энергии использовать в зависимости от местных условий другие ВИЭ, такие как ветер, биомасса, малые гидроэлектростанции и геотер-

мальная энергия, которые могут взаимно дополнять друг друга и стать жизнеспособной альтернативой традиционным сетевым решениям для электрификации сельских районов.

Во всем мире и в последнее время особенно в сельской местности развивающихся стран активно применяются гибридные системы возобновляемой энергетике (*Hybrid Renewable Energy Systems – HRES*), которые сочетают в себе несколько разных источников энергии, что позволяет значительно снизить перебои с поставкой энергоресурсов потребителям, повысить эффективность использования систем возобновляемой энергии, надежность и экономику электроснабжения, а также качество электроэнергии у конечных потребителей на селе.

Различные ВИЭ имеют взаимодополняющие про-

фили генерации. Комбинируя несколько источников, система энергоснабжения *HRES* может поддерживать более стабильную выходную мощность местной генерации, уменьшая влияние изменчивости отдельных источников ВИЭ. Например, солнечные батареи вырабатывают энергию днем, в то время как ветряные турбины могут вырабатывать энергию ночью или в пасмурные дни. Несмотря на то что первоначальные инвестиционные затраты могут быть достаточно высокими, гибридные системы в долгосрочной перспективе оказываются более экономически эффективными и служат успешной альтернативой дизель-генератору как самому распространенному источнику энергии в сельской местности.

Многие сельхозпредприятия, подключенные к слабым распределительным сетям с низкой надежностью энергоснабжения, вынуждены устанавливать дизельную генерацию для резервирования наиболее ответственной нагрузки в случае отключения централизованного электроснабжения. Установка гибридных солнечных фотоэлектрических систем с участием дизель-генераторов и систем накопления энергии может существенно снизить производственные затраты по сравнению с системами с одним источником питания, в частности дизель-генераторами, а в ряде случаев полностью отказаться от использования топлива.

Международным энергетическим агентством (МЭА, *IEA*) было представлено развитие гибридных систем электроснабжения в мировой практике и освещены основные проблемы с точки зрения проектирования, технических аспектов и внедрения, позволяющие принимать обоснованные решения при рассмотрении потребностей в электрификации сельских районов (*URL: Rural Electrification with PV Hybrid Systems. Overview and Recommendations for Further Deployment. Report IEA-PVPS T9-13:2013. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Rural_Electrification_with_PV_Hybrid_systems_-_T9_-_11072013_-_Updated_Feb2014.pdf*).

За последние годы эффективность и выходная мощность солнечной фотовольтаики (*PV*) благодаря развитию современных технологий и увеличению объемов производства повысились, а стоимость фотоэлектрических систем снизилась во всем мире. Ожидается, что к 2050 году солнечные фотоэлектрические панели станут одним из самых дешевых доступных источников энергии. Низкие затраты на установку и экономия до 95% в месяц на тарифах на электроэнергию, оплачиваемых пользователями при централизованном электроснабжении, а также дорогостоящие требования к расширению

сети при увеличении объемов энергопотребления, делают источники распределенной солнечной энергии весьма конкурентоспособными на розничном рынке электроэнергии. Фотоэлектрические системы, подключенные на низком уровне напряжения вблизи конечных потребителей, становятся более привлекательными в мире с экономической точки зрения, чем покупка электроэнергии из сети (*URL: Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency (IRENA). 2019. Abu Dhabi*).

Технологии *HRES* по установке на стороне конечного потребителя ВИЭ-генерации с возможностью использования местных природных ресурсов, благодаря снижению стоимости устройств малой генерации и их быстрой окупаемости, активно развиваются во всем мире, особенно в сельских регионах с низкой надежностью электроснабжения.

Согласно официальной статистике Международного агентства по возобновляемой энергии (*IRENA*), с 2010 года выровненная стоимость энергии (показатель средней чистой приведенной стоимости выработки энергии генератором за весь срок его службы – *LCOE*) снизилась с 0,38 до 0,06 долл./кВтч для фотоэлектрических систем и с 0,09 до 0,04 долл./кВтч для ветряных электростанций (*URL: Renewable Power Generation Costs in 2019. International Renewable Energy Agency IRENA (2020). Abu Dhabi. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>*). Это позволяет делать установки ВИЭ-генерации на солнце и ветре экономически более эффективными по сравнению с централизованным электроснабжением. Гибридные энергосистемы, основанные на ВИЭ, – подходящее и экономически выгодное решение для электрификации сельских районов (*URL: Alliance for Rural Electrification. Hybrid power systems based on renewable energies: a suitable and cost-competitive solution for rural electrification. 2008*).

В последнее время в России, особенно в ее южных регионах, многие сельские предприятия и население, стали активно вкладывать денежные средства и устанавливать собственные солнечные энергосистемы (*СЭС*) небольшой мощности, в первую очередь, чтобы компенсировать постоянный рост тарифов на электроэнергию, а также повысить надежность энергоснабжения при длительных нарушениях централизованного электроснабжения. Многочисленные примеры установки микро-*СЭС* малыми предприятиями различного направления деятельности в России показывают, что такие установки

быстро окупаются, особенно в регионах с высокой стоимостью электроэнергии для конечного потребителя на низком уровне напряжения, позволяют потребителю впоследствии получать высокий уровень денежного дохода при расчетах с поставщиками электроэнергии, а также дополнительно избежать существенных расходов по оплате местной сетевой организации увеличение установленной мощности при развитии производства.

В отчете Международного альянса по сельской электрификации (*ARE*) роль инноваций частного сектора признана главной движущей силой развития микро- и минисетей распределенной возобновляемой энергетике (*Distributed Renewable Energy – DRE*), при этом отмечено, что ключевая проблема развития сектора *DRE* заключается в создании надежной нормативно-правовой базы в этой области для повышения доверия потребителей и увеличения инвестиций с целью преобразования местной системы энергоснабжения и повышения уровня жизни в сельской местности. Микросети *DRE* успешно развиваются и хорошо зарекомендовали себя во всем мире, в отчете *ARE* отмечено, что только в развивающихся странах Африки до 2021 года было установлено 3100 микросетей и планируется установка порядка 160 тысяч микросетей *DRE* к 2030 году ([URL: Accelerating private sector investments in green mini-grids. ARE Energy Access Investment Forum 2023. https://www.ruralelec.org/wp-content/uploads/2024/05/eaif_keytakeawaysreport2023.pdf](https://www.ruralelec.org/wp-content/uploads/2024/05/eaif_keytakeawaysreport2023.pdf)).

Принятые в России закон о микрогенерации и изменения по функционированию распределенной микрогенерации на розничном рынке электроэнергии и мощности позволяют не только обеспечивать собственную нагрузку за счет дешевой электроэнергии ВИЭ, но и продавать излишки электроэнергии в сеть (Федеральный закон от 27.12.2019 № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации»; Постановление Правительства РФ от 02.03.2021 № 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации»). В связи с этим у сельских потребителей появилась законодательная возможность последовательно развивать собственную микрогенерацию, создавать локальные микросети, максимально используя современные достижения в развитии технологий ВИЭ и возможности управления режимами генерации и спроса с помощью информационно-коммуникационных технологий (ИКТ).

Инновационные решения, такие как удаленный мониторинг в режиме реального времени, автоматизированные системы управления генерацией и спросом, программное обеспечение и средства передачи данных с применением современных платформ ИКТ, инновационные средства для хранения энергии, расширенное картографирование и ГИС, а также новые высококачественные и модульные технологии, такие как искусственный интеллект и нейронные сети, могут помочь снизить стоимость микросетей *HRES*, одновременно повышая их эффективность, долговечность и экологичность.

Как правило, сельские потребители в настоящее время размещают сетевые солнечные системы небольшой мощности, в основном крышные системы панелей *PV*, которые устанавливаются очень быстро, не требуют согласования с сетевой организацией, стоят относительно недорого и окупаются довольно быстро, особенно при высоких тарифах на электроэнергию для малых предприятий на розничном рынке. В последующем предприятие получает практически бесплатную солнечную электрическую энергию, так как такие установки практически не требуют эксплуатационных затрат.

В случае возможности продажи излишков электроэнергии в сеть, в соответствии с законом РФ о микрогенерации, местная сетевая организация обязана за дополнительную плату в зависимости от мощности подключаемой генерации потребителя установить ему двунаправленный интеллектуальный счетчик электроэнергии, по которому будут производиться взаиморасчеты с местной энергосбытовой организацией и конечный потребитель может получать дополнительную прибыль при выдаче излишков электроэнергии в сеть.

Такая сетевая солнечная система проста в обслуживании, позволяет дистанционно практически в режиме реального времени контролировать выработку солнечной энергии и электропотребление предприятия, но обладает существенным недостатком: может работать только при наличии напряжения во внешней электросети. Чтобы сохранить работоспособность солнечной станции при частых и длительных отключениях электросети, что характерно для многих сельских распределительных сетей, необходимо устанавливать гибридную солнечную систему с накопителями энергии (аккумуляторами) и гибридным инвертором, что делает систему значительно дороже, но при этом обеспечивает достаточную надежность энергоснабжения предприятия при длительных отключениях внешней сети.

Распределенная сельская микрогенерация с использованием ВИЭ, объединенная с нагрузкой низковольтными электрическими сетями в локальной местности, известна как микросеть (*microgrid – MG*), которая может функционировать как подключенной к внешней сети, так и автономно в случае перерыва централизованного электроснабжения. В дополнение к обеспечению местных потребителей надежным электроснабжением управляемые микросети могут регулировать собственную нагрузку и продавать излишки электроэнергии во внешнюю сеть в периоды низкого спроса или избыточного производства микрогенерации.

Интеллектуальные сети в сельских районах дают возможность внедрять распределенную генерацию с различными источниками возобновляемой энергии, а также развивать сельские сообщества путем развития информационных технологий. Интеллектуальная электросеть в сельской местности предполагает применение инновационных решений для производства электроэнергии – интеллектуальные счетчики и датчики, способные измерять параметры с приемлемой точностью: активную мощность, реактивную мощность, напряжение, ток, спрос и так далее. Пассивные распределительные сети сегодняшнего дня находятся на этапе перехода к интеллектуальным сетям будущего. Сельские интеллектуальные электросети (*Rural Smart Grids*) обеспечивают повышение надежности электроснабжения и качества электроэнергии для конечных потребителей, включая население.

Развитие интеллектуальной энергетической инфраструктуры в сельской местности в России должно обеспечить повышение эффективности производства сельскохозяйственной продукции, создание умных сельхозпредприятий, улучшение качества и условий проживания сельских жителей, поэтому следует уделять большое внимание и тщательно изучать развитие процесса внедрения и эксплуатации *Rural Smart Grid* за рубежом, чтобы с максимальной пользой применять этот опыт в сельских электрических сетях России.

Микросети с использованием ВИЭ становятся эффективным решением электрификации сельской местности, которое может сократить дефицит электроэнергии и дополнить существующие программы электрификации села. Необходимо максимально применять зарубежный опыт для оптимизации решений по использованию микросетей в отечественных условиях развития сельской энергетики, а также дальнейшие исследования и разработки, чтобы обеспечить эффективное использование

этих систем в сельских районах России (*URL: Rural Electrification with PV Hybrid Systems. Overview and Recommendations for Further Deployment // Report IEA-PVPS T9-13:2013. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Rural_Electrification_with_PV_Hybrid_systems_-_T9_-_11072013_-_Updated_Feb2014.pdf*).

Цель исследования – изучить зарубежный опыт и научные исследования по развитию систем электроснабжения сельских потребителей с участием разнообразных источников возобновляемой энергии, оценить преимущества, проблемы и перспективы развития гибридных микросистем для использования этого опыта с целью развития распределенной возобновляемой энергетики в сельскохозяйственных регионах России.

Материалы и методы. Проанализировали многочисленные зарубежные публикации по внедрению гибридных микросистем возобновляемой энергетики в сельской местности, в том числе материалы Международного энергетического агентства (*IEA*), Международного агентства по возобновляемой энергии (*IRENA*) и Международного альянса по сельской электрификации (*ARE*). Использовали метод системного анализа.

Результаты и обсуждение. Более двух десятилетий назад Консорциум по технологическим решениям для обеспечения надежности электроснабжения (*CERTS*) предложил концепцию микросетей, которая предполагает объединение нагрузок и распределенных микроисточников генерации, работающих как единая система, обеспечивающая электроэнергией локально расположенных потребителей. Микросеть должна быть оснащена электроникой, чтобы обеспечить необходимую гибкость для работы в качестве единой объединенной системы. Такая гибкость управления позволяет микросети *CERTS* представлять собой единый управляемый блок, который управляет интерфейсом между микроисточниками и нагрузкой, отвечающий местным требованиям надежности и безопасности. Важная особенность микросети *CERTS* состоит в том, что она представлена для окружающей распределительной сети как единый самоуправляемый объект.

Фундаментальным исследованием и развитием микросетей с гибридными источниками энергии занимаются многие институты и организации с мировым авторитетом, среди которых необходимо выделить Международное энергетическое агентство разработавшее подробную дорожную карту развития *Smart Grids*, где основное внимание уделяется инфраструктуре микросети, позволяющей осуществлять мониторинг и управление подачей

электроэнергии от источников генерации к конечным потребителям в режиме реального времени. Технологии *Smart Grid* особенно важны, поскольку они дают возможность использовать совместно ряд других низкоуглеродных энергетических технологий, включая различные ВИЭ, системы накопления энергии и реагирование на спрос, а также цифровые и другие передовые технологии для мониторинга и управления микросетью.

В рамках мирового тренда развития микросетей, особенно в сельской местности развитых и развивающихся стран, МЭА выделило ряд направлений, связанных с электрификацией сельских потребителей, из которых можно выделить два направления. Цель задачи 9-й Программы МЭА по фотоэлектрическим энергетическим системам (*IEA-PVPS T9*) – изучение состояния небольших распределенных гибридных систем генерации электроэнергии и разработка фотоэлектрических/дизельных гибридных систем для электрификации сельских районов при решении вопросов проектирования, технических аспектов и внедрения гибридных систем в качестве надежного и экономичного источника питания сельского потребителя. Отмечено, что комбинированные технологии открывают перспективные возможности для преодоления определенных технических ограничений [1].

Другое направление Программы МЭА (*IEA-PVPS T14*) заключается в изучении влияния величины мощности подключенных к сети фотоэлектрических микросистем на условия работы системы централизованного электроснабжения, оптимизации и управления местным активным электропотреблением, включая контроль подачи энергии в сеть для участия в энергетическом рынке, поиск оптимального баланса между различными ВИЭ в сельских сетях с высоким уровнем проникновения фотоэлектрических систем и определение размера микросистемы.

В отчете *IRENA* представлены подробные исследования по основным функциям мини- и микроэлектросетевых технологий: выработка электроэнергии с участием ВИЭ; накопление энергии; контроль, измерение и управление; преобразование и потребление. Показано, что инновации во всех без исключения функциях микросетей от выработки до потребления играют решающую роль в расширении сервисных услуг и масштабов использования возобновляемых микросетей будущего, что требует учета соответствующих технологических усовершенствований на этапах планирования и проектирования.

Масштабное развитие микросетей и инновации приведут к упрощению внедрения возобновляемых минисетей в течение следующих двух десятилетий,

улучшению их управляемости и значительному снижению их стоимости. По мере снижения затрат возобновляемые микросети будут иметь больший экономический смысл и в большей степени конкурировать с расширением магистральных сетей. К 2035 году возобновляемые микросети станут экономически выгодным вариантом даже в районах, расположенных вблизи основной сети, при этом обеспечивать более высокий уровень обслуживания при меньших затратах.

На рисунке 1 показан представленный *IRENA* прогноз снижения стоимости возобновляемых микросетей с момента первоначального их внедрения до 2035 года (синим цветом обозначен более высокий уровень обслуживания).

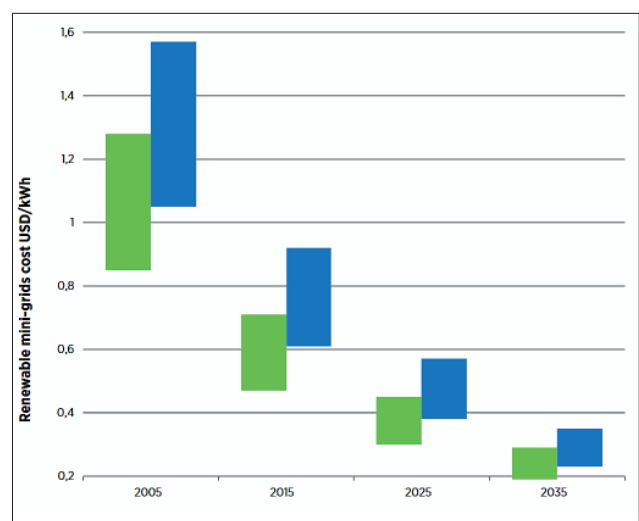


Рис. 1. Прогноз снижения стоимости возобновляемых микросетей

Fig. 1. Forecast of reduction in the cost of renewable microgrids

Возобновляемые микросети в последние годы активно внедряются во многих сельских районах Африки, Азии и Латинской Америки на смену традиционным решениям, таким как дизельные генераторы, из-за высоких затрат на топливо и питание от национальных сетей, материально-технических трудностей их реконструкции и расширения в пересеченной местности. Микросети все больше используют различные ВИЭ с учетом возможностей местных природных ресурсов, создавая в сельской местности локальную микросистему, имеющую возможность работы как в режиме подключения к национальной электросети, так и в островном режиме при перерывах централизованного электроснабжения.

Многочисленные зарубежные исследования показывают, что потенциал гибридных микросетей для надежного электроснабжения потребителей

в сельской местности, использующих совместно несколько технологий ВИЭ, высок. Такие системы могут эффективно сбалансировать производство и потребление энергии, существенно снизить зависимость от традиционных электросетей и повысить надежность электроснабжения конечного сельского потребителя, минимизируя при этом воздействие на окружающую среду [2].

Современные технологические достижения, особенно в области управления микросетью и систем хранения электроэнергии, имеют решающее значение для обеспечения соответствия необходимого баланса непостоянной производительности распределенных ВИЭ и переменной нагрузки. При этом мощность, вырабатываемая комбинациями «солнце – ветер», «ветер – гидроэлектростанция», «солнце – гидроэлектростанция», намного выше по сравнению с отдельными системами ВИЭ, использующими только один возобновляемый источник энергии, и при объединении источников ВИЭ экономическая эффективность и надежность работы *HRES* становится также намного выше.

Экономический анализ гибридных систем показывает, что они становятся все более востребованными и экономически эффективными с пролонгированным потенциалом существенного сокращения расходов на производство электроэнергии, особенно в регионах с богатыми солнечными, ветряными и гидроресурсами. Развитие малой гидроэнергетики экономичнее, чем использование других ВИЭ, таких как ветер, солнце или биомасса. Срок службы микроГЭС (более 40 лет в отличие от СЭС, у которой этот срок составляет 25 лет) самый высокий среди других ВИЭ, ее мощность в суточном разрезе практически не меняется, как в случае с солнцем и ветром, и микроГЭС может постоянно обслуживать необходимый объем нагрузки потребителя, компенсируя этот объем дорогой электроэнергией из сети. Основное преимущество гидроветросолнечной гибридной энергетической системы – при совместном использовании снижается общая стоимость системы и стоимость вырабатываемой *HRES* электроэнергии, при этом значительно повышается надежность электроснабжения. Принципиальная схема такой *HRES* представлена на рисунке 2 [3].

Гибридные системы возобновляемой энергетики предлагают гибкий и устойчивый подход к электрификации сельских районов, особенно подходящий для районов с ограниченным доступом к традиционной сетевой инфраструктуре или при централизованном электроснабжении с низким уровнем надежности. Основная концепция *HRES* заключается в

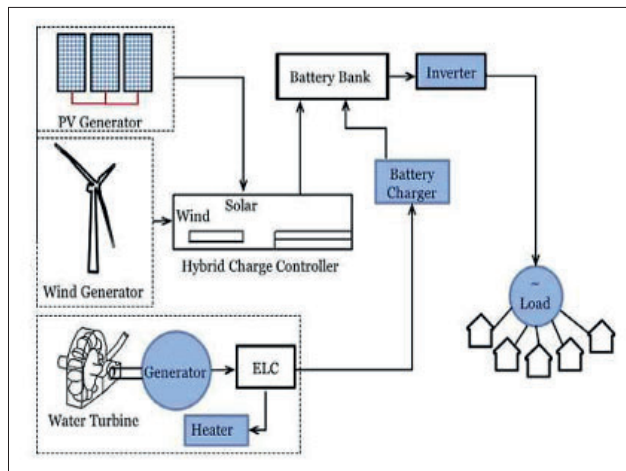


Рис. 2. Принципиальная схема гидроветросолнечной гибридной микросистемы

Fig. 2. Schematic diagram of a hydro-wind-solar hybrid microsystem

объединении нескольких ВИЭ, таких как солнечная фотоэлектрическая энергия, ветер, биомасса и малая гидроэнергетика, для создания более надежного и эффективного энергоснабжения за счет применения взаимодополняющих преимуществ каждого из них, решая проблемы с перебоями, часто связанными с использованием энергии из одного источника [4]. В то время как солнечные фотоэлектрические системы вырабатывают электроэнергию в солнечные дни, ветряные турбины могут продолжать вырабатывать электроэнергию ночью, в пасмурные или ветреные дни, заряжая аккумуляторные батареи и обеспечивая сбалансированное и непрерывное энергоснабжение [5].

Солнечные батареи, ветряные турбины, генераторы на биомассе и малые гидроэлектростанции служат основными источниками энергии в большинстве *HRES*. Выбор этих источников зависит от наличия природных ресурсов на местах. Например, в регионах с обилием солнечной инсоляции приоритет может отдаваться солнечным фотоэлектрическим установкам, в районах с постоянным ветром могут устанавливаться ветряные турбины, но более эффективным долгосрочным решением будет установка солнечно-ветровой генерации [6]. В сельской местности, где имеются большие объемы сельскохозяйственных или древесных отходов, вместо затрат на их утилизацию лучшим решением будет использование солнечной энергии и энергии биомассы [7].

Один из важнейших компонентов, учитывая неустойчивый характер ВИЭ, – накопители энергии для хранения избыточной энергии с целью использования в периоды низкой выработки энергии из возобновляемых источников, например, в ночное

время или при слабом ветре или большой облачности. Обычно применяется технология аккумуляторных батарей, которая значительно продвинулась вперед, став более экономичной и действенной, что повышает надежность *HRES*. Как правило, *HRES* оснащаются системами накопления энергии (*ESS*), подключаемыми к основной системе с помощью электронных устройств, которые сглаживают колебания, повышают гибкость системы, компенсируя пиковую нагрузку, когда другие генераторы по какой-либо причине не могут полностью поддерживать нагрузку [8]. Большой недостаток установки аккумуляторных батарей состоит в их высокой стоимости и коротком сроке службы (5-8 лет) в зависимости от режимов их эксплуатации, что вынуждает несколько раз проводить их замену и существенно отражается на общей стоимости *HRES*, которая обычно составляет не менее 25 лет [9].

Разнообразные комбинации распределенной генерации и аккумуляторных батарей объединяются с помощью различных устройств силовой электроники, где ключевыми компонентами служат системный контроллер и инверторы, которые регулируют поток электроэнергии внутри микросети, обеспечивая оптимальное распределение энергии и эффективное хранение для обеспечения баланса электроэнергии при изменении режимов генерации и режимов нагрузки. Инверторы преобразуют постоянный ток, генерируемый такими источниками, как солнечные панели и батареи, в переменный ток, совместимый со стандартным электрическим оборудованием потребителя [10].

Для поддержания стабильного баланса выработки и потребления электроэнергии в рамках *HRES* необходимы передовые системы управления, часто используются для управления питанием от нескольких источников и накопителей, балансируя спрос и предложение в режиме реального времени, включая эффективное управление нагрузкой. Методы управления нагрузкой, такие как реагирование на спрос и определение приоритетов энергопотребления, помогают оптимизировать использование имеющихся ресурсов, снижая потребность в дополнительном хранилище и повышая эффективность системы [11].

В гибридной микросети применяются две шины постоянного и переменного тока с интеллектуальными двунаправленными преобразователями и работающим параллельно с сетью интеллектуальным инвертором гибридного типа с возможностью автономной работы, которые совместно способны оптимизировать выработку и использование энергии как в сетевых, так и в автономных сценариях, объединяя различные источники генерации и накопления

энергии в единую микросистему для поддержания необходимых показателей качества электроэнергии на шинах потребителя в различных режимах работы *HRES* [12].

Микросети, учитывая небольшую мощность микрогенерации и сельских потребителей электроэнергии, а также широкое использование фотоэлектрических панелей, подключаются на низком уровне напряжения к точке общего соединения (*Point of Common Coupling – PCC*) с помощью статического переключателя, положение которого определяет подключенный к сети или изолированный режим работы микросети и реализует переход между ними. Статический переключатель – это быстродействующее полупроводниковое коммутационное устройство с высокой перегрузочной способностью для обеспечения высокоскоростного управления *DER* [13].

Для централизованного управления микросетью в подключенных к сети и изолированных режимах используется интеллектуальный гибридный инвертор. Одна из основных задач гибридного инвертора – быстрое отключение и обеспечение надежного энергоснабжения потребителей за счет собственной генерации в случае потери напряжения во внешней сети с последующим подключением к сети в случае восстановления электроснабжения. Следовательно, необходим соответствующий метод управления, позволяющий осуществлять плавный переход и автоматизацию в случаях внезапного отключения и подключения внешнего энергоснабжения, при этом для каждого режима работы необходима разработка отдельных принципов управления микросетью [14].

Принципиальная схема подключенной к системе централизованного энергоснабжения гибридной микросети с двунаправленными преобразователями и гибридным инвертором представлена на *рисунке 3*.

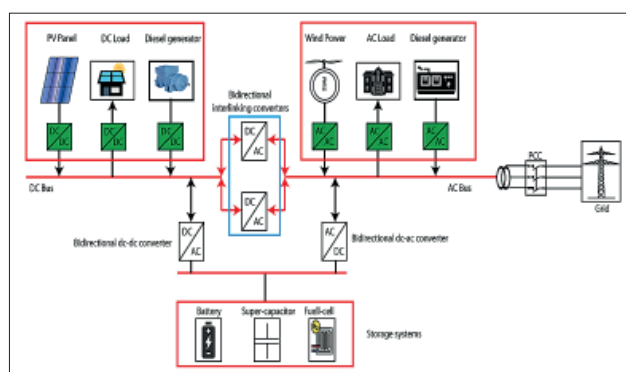


Рис. 3. Принципиальная схема гибридной микросети с двунаправленными преобразователями и гибридным инвертором

Fig. 3. Schematic diagram of a hybrid microgrid with bidirectional converters and a hybrid inverter

Микросеть становится новой надежной и устойчивой к непредвиденным ситуациям системой, интегрирующей распределенную генерацию и позволяющей ей работать должным образом даже в случаях изоляции от основной электрической системы. Для обеспечения этих задач требуется взаимодействие между всеми микрогенераторами и нагрузкой, оно осуществляется с помощью иерархического подхода, в зависимости от доступных каналов связи возможно использовать иерархический подход к управлению, разделенный на различные уровни [15].

При подключенном к сети режиме работы микросети генераторы *HRES* принимают значения частоты и напряжения от основной сети, а при отключении от основной сети в *PCC*, как показано на рисунке 3, микросеть должна продолжать работу в автономном режиме, при этом опорные значения частоты и напряжения должны поддерживаться по крайней мере одним из микрогенераторов [16].

Первичное управление самое быстрое из всех, с коротким временем отклика, как правило, около миллисекунды, если оно выполняется с помощью инвертора. Вторичный контроль действует после первичного контроля и выполняется в течение периода от нескольких секунд до нескольких минут, сравнивая измеренные значения отвечает за восстановление значений частоты и напряжения путем сведения отклонений к нулю, для него требуются каналы связи, и он может использовать стратегии распределенного или централизованного управления. Третичное управление самое медленное и работает в течение нескольких минут или часов, оно управляет оптимальным потоком и распределением энергии по микросети по технико-экономическим критериям. На рисунке 4 приведена в упрощенном виде схема иерархического контроля *HRES* [17, 18].

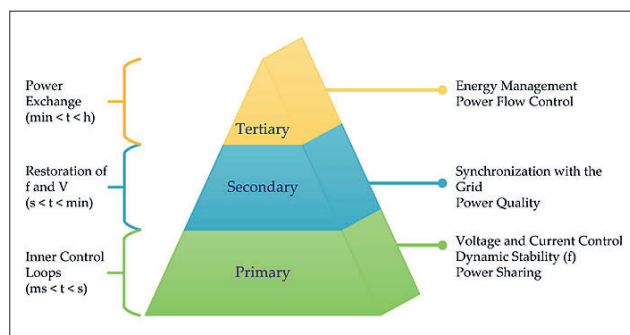


Рис. 4. Иерархический контроль *HRES*

Fig. 4. Hierarchical control of *HRES*

В рамках стратегии управления микросетью важнейшим компонентом выступает система энергоменеджмента (*Energy Management System – EMS*),

отвечающая за планирование, контроль и регулирование баланса спроса и предложения в микроэнергосистеме для обеспечения надежной, экономичной и результативной работы, одновременно внося свой вклад в прибыль предприятия. *EMS* определяется как компьютерная система, состоящая из программной платформы, предоставляющей основные вспомогательные услуги, и набора приложений, обеспечивающих необходимую функциональность для эффективной работы *HRES*, и гарантирует надлежащую безопасность энергоснабжения при минимизации затрат [19].

Система энергоменеджмента отслеживает и прогнозирует спрос на энергоснабжение в пределах микросети, принимая во внимание такие факторы, как погодные условия, изменчивость нагрузки и уровни накопления энергии, выполняет различные операции, включая анализ данных, прогнозирование, оптимизацию, человеко-машинный интерфейс и взаиморасчеты с поставщиком электроэнергии при централизованном энергоснабжении, где дополнительное управление используется для достижения экономической оптимизации, основанной на затратах на электроэнергию на розничном рынке электроэнергии [20].

Цифровизация *MG* открывает значительные возможности для повышения их производительности, устойчивости и стабильности при эксплуатации, оптимизации режимов, а также при проектировании и развитии микросетей [21].

Smart Rural MicroGrid знаменует собой современный подход управления электроэнергией, которая использует информационные технологии для повышения эффективности производства, доставки и потребления электроэнергии, повышения надежности и экологичности энергоснабжения сельских потребителей. Технологические достижения в области интернета вещей (*IoT*), включая усовершенствования чипов, средств подключения, безопасности и искусственного интеллекта, снижают затраты и позволяют создавать более эффективные устройства. Сфера *IoT* в производстве и потреблении энергии быстро развивается благодаря значительным достижениям в области интеллектуального учета и технологий прогнозного технического обслуживания [22].

MG приобрели популярность в последние годы в результате технологических усовершенствований в малой энергетике, они становятся все более востребованными в регионах и районах с неадекватной или ухудшающейся энергетической инфраструктурой. По всему миру проводятся различные развертывания *MG* или текущие эксперименты, чтобы лучше

понять, как они работают. Для различных целей в мире было исследовано множество технологий и топологий, которые требуют дальнейших усовершенствований, в первую очередь, в области интеллектуального управления. Ожидается, что рынок *MG* в мире будет продолжать активно расти [23].

Принятые закон о микрогенерации и изменения в правилах функционирования распределенной микрогенерации на розничном рынке электроэнергии и мощности заработали в России с 2020 года, значительно позже, чем этот процесс шел за рубежом. Однако эти изменения открывают широкие перспективы для развития микрогенерации и микросетей в России и особенно в сельской местности. В соответствии с законом о микрогенерации, установившие объект микрогенерации потребители могут подключаться к общим сетям на низком уровне напряжения до 1 кВ и продавать гарантирующим поставщикам и независимым энергосбытовым компаниям излишки электроэнергии мощностью не более 15 кВт. В России законодательно появилась возможность создания новой энергетической инфраструктуры – распределенной энергетике, которая может использовать локальную выработку энергии, включая солнечную энергию и энергию ветра, малую гидроэлектростанцию и биомассу, работать как при наличии централизованной системы энергоснабжения, так и при отключениях внешней электросети.

В сентябре 2022 года Комитет Государственной Думы по энергетике рассмотрел актуальные вопросы развития микрогенерации в РФ. Было отмечено, что сектор микрогенерации в России с участием ВИЭ пока незначимый.

По оценкам Ассоциации развития возобновляемой энергетике (АРВЭ) ежегодные объемы ввода микрогенерации на основе ВИЭ в России в 2020-2021 годах составляли около 50 МВт (включая объекты без выдачи электроэнергии в сеть), при этом основная часть этого объема установлена на объектах юридических лиц, на частных лиц приходится объем в диапазоне 10-15 МВт, при этом в течение ближайших пяти лет объемы ввода микрогенерации на основе ВИЭ в России могут составить 150-200 МВт в год, а оборот рынка достигнет порядка 10 млрд руб.

На заседании Комитета Госдумы по энергетике прозвучали предложения ряда участников об увеличении разрешенной мощности выдачи излишков микрогенерации в сеть до 150 кВт, что должно активизировать малые предприятия на розничном рынке по установке ВИЭ. В части реализации проекта «Активный потребитель», стратегических направлений в области цифровой трансформации

топливно-энергетического комплекса, утвержденных Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.12.2021 № 3924-р, предусмотрено увеличение объема рынка микрогенерации до более 1 ГВт к 2030 году (Развитие микрогенерации в Российской Федерации: актуальные вопросы // Комитет Государственной Думы по энергетике. 16 сентября 2022 г. URL: komitet-energo.duma.gov.ru).

Развитие сельского хозяйства в России требует совершенствования современных технологий энергоэффективного и надежного энергоснабжения, соответствующего растущим запросам сельских потребителей. Построенные много десятилетий назад сельские распределительные электрические сети подвержены высокому износу, не могут обеспечить без соответствующей реконструкции необходимый рост электрической нагрузки потребителей, часто их отключают и оставляют на длительный срок без централизованного энергоснабжения, что приводит к серьезным убыткам сельскохозяйственного производства и значительному снижению уровня жизни сельских жителей. Другая серьезная проблема малых предприятий в ряде сельскохозяйственных регионов России, получающих электроэнергию на низком уровне напряжения 0,4 кВ, заключается в высокой и постоянно растущей стоимости электроэнергии, что серьезно отражается на рентабельности производства продукции.

Эти проблемы с энергоснабжением заставляют потребителей в сельских поселениях, включая домохозяйства, самостоятельно и за свой счет решать вопросы надежности электроснабжения и снижения денежных расходов на оплату электроэнергии. Многие малые предприятия решали вопросы надежного электроснабжения путем установки резервных дизельных генераторов, а домохозяйства – бензогенераторов, которые требовали обеспечения запасов и расхода дорогостоящего топлива, оказывая пагубное влияние на окружающую среду. В последние годы все больше сельхозпредприятий и домохозяйств стали устанавливать солнечную генерацию, а принятие закона о микрогенерации в России с возможностью выдачи излишков электроэнергии в сеть и экономические показатели установки на стороне конечного потребителя такой генерации делают ее в настоящее время наиболее востребованной, особенно в южных сельскохозяйственных регионах с высокой солнечной инсоляцией и высокими тарифами на электроэнергию.

В сельской местности имеется возможность, помимо фотоэлектрических панелей, использовать широкий спектр генерирующих установок: ветряные

турбины, микрогидроэнергетические установки, генераторы на биотопливе и биогазе, дизельные, бензиновые и газотурбинные генераторы. Эти источники генерации могут в зависимости от местных природных условий работать как отдельно, так и в различных комбинациях, максимально используя установки солнечной генерации. Для обеспечения максимальной эффективности работы таких гибридных микросистем в условиях стохастических изменений генерации ВИЭ и колебаний нагрузки микросистема обычно оснащается источником хранения энергии в виде аккумуляторов или других устройств накопления энергии, а также технологиями регулирования нагрузки в зависимости от спроса.

Дальнейшее развитие рынка микрогенерации в сельской местности с применением ВИЭ для снижения платежей за электроэнергию и повышения надежности электроснабжения, увеличение количества источников генерации и их суммарной установленной мощности в локальной местности неизбежно приведут к созданию сельских микросетей и необходимости создания автоматизированных систем управления, которые должны обеспечить надежную работу микросистемы как в подключенных к местной распределительной системе режимах, так и в случае отключения от внешнего электроснабжения. При этом система управления должна регулировать спрос и предложение на электроэнергию, обеспечивать выравнивание графиков генерации и нагрузки для оптимизации работы микросети в соответствии с изменениями стоимости на электроэнергию в течение суток.

Рынок микрогенерации на основе использования ВИЭ в России в основном представлен солнечными фотоэлектрическими станциями. Для установок СЭС отсутствуют серьезные ограничения по минимальной мощности, размещению и обслуживанию, характерные для других объектов ВИЭ, таких как ВЭС или микроГЭС. Основными участниками рынка микрогенерации остаются малые коммерческие предприятия, которые пытаются оптимизировать затраты на энергопотребление в связи с неуклонным ростом тарифов на электроэнергию. На конец 2023 года было заключено 458 договоров о продаже в единую сеть электроэнергии, выработанной на объектах микрогенерации, при этом только один договор заключен с объектом ветрогенерации и еще один – с гибридным ветросолнечным комплексом (Энергетика и промышленность России. 2024. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2024/606681.htm>).

Имеется значительный спрос на СЭС и со стороны частных домовладений, что служит перспективным

направлением для возобновляемой энергетики и может внести весомый вклад в прогнозируемый рост рынка. Например, в США установленная мощность в микрогенерации на солнечных панелях составляла 16 ГВт (по данным на май 2017 года). В России потенциал суммарной установленной мощности микрогенерации на ВИЭ для домохозяйств может составлять 86,5 ГВт со среднегодовой мощностью с учетом коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) солнечных панелей около 11 ГВт. Максимальный потенциал сосредоточен в Центральном, Южном и Приволжском федеральных округах (Распределенная энергетика в России: потенциал развития. Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. 2018).

Внедрение микрогенерации в сельском секторе имеет свои значительные преимущества в области повышения надежности и эффективности электроснабжения сельских потребителей. Большинство сельских распределительных сетей в России построены в 50-70 годы прошлого века, отличаются большим износом, подвержены частым и длительным отключениям, не рассчитаны на возрастающую электрическую нагрузку сельских потребителей, при этом стоимость электроэнергии постоянно растет.

Рост стоимости электроэнергии и надежность электроснабжения отражаются на эффективности работы малых предприятий и фермерских хозяйств в ряде южных сельскохозяйственных регионов России, где часто наблюдаются перерывы электроснабжения в сельской местности, а стоимость электроэнергии существенно выше, чем в других регионах России. Наиболее активно солнечная микрогенерация развивается в Краснодарском крае, где наблюдается наиболее высокая солнечная инсоляция и имеется большое количество компаний с большим опытом по продвижению солнечной микрогенерации для малых предприятий и населения в сельской местности [24].

Принятие закона о микрогенерации стало первым законодательным шагом в России для дальнейшего развития микрогенерации и интеллектуальных микросетей. При подключении к внешней сети, установившие интеллектуальный двунаправленный счетчик электроэнергии и микрогенерацию, отдельные малые предприятия и домохозяйства в сельской местности становятся хоть и в малых объемах полноправными участниками розничного рынка. В результате потребитель с помощью современных информационно-коммуникационных технологий может постоянно контролировать объемы собственного производства и потребления электроэнергии из сети, анализировать режимы работы нагрузки, чтобы

в дальнейшем принимать решения по оптимизации и развитию системы энергоснабжения.

В каждом сельском поселении в местных распределительных сетях низкого напряжения существует большое количество потребителей (включая домохозяйства) различного функционального назначения с разной установленной мощностью, различными режимами работы и графиками нагрузки. Каждый потребитель, исходя из необходимости и финансовых возможностей, самостоятельно решает вопрос по установке генерации. Практика последних лет показывает, что большая часть владельцев солнечных панелей устанавливает их совместно с сетевыми фотоэлектрическими инверторами для экономии на платежах за электроэнергию. Такие установки стоят относительно недорого и при нынешнем уровне тарифов на электроэнергию и их дальнейшем росте довольно быстро окупаются, буквально за несколько лет [25].

Однако сетевые СЭС не решают вопросов надежного энергоснабжения потребителей там, где изношенные сельские сети подвержены частым и длительным отключениям, поэтому потребители в этой местности вынуждены устанавливать у себя резервную дизельную генерацию или СЭС с гибридными инверторами, позволяющими автоматически переходить на автономный режим работы при отключениях в сети и нести необходимую часть ответственной нагрузки. Такие гибридные СЭС, как правило, требуют установки аккумуляторных батарей и более сложного управления балансом генерации и потребления электроэнергии в режимах подключения к сети и в островном режиме. Соответственно, они стоят значительно дороже сетевых СЭС и окупаются дольше.

Рост тарифов на электроэнергию и низкая надежность сельских электросетей неизбежно ведут к увеличению числа активных потребителей и интеграции большого количества источников распределенной генерации с участием ВИЭ. Появление в сельской местности все большего количества участников с распределенной генерацией, в том числе потребителей, имеющих право выдачи излишков электроэнергии в сеть, начинает существенно менять структуру местной электроэнергетики, отражается на условиях работы, качестве электроэнергии и надежности энергоснабжения всех потребителей распределительной электросети низкого напряжения в сельском поселении. Все это потребует соответствующей модернизации существующей системы энергоснабжения поселения путем создания интеллектуальной электрической сети с собственной системой управления.

Основное преимущество распределенной генерации заключается в возможности быстрого расширения, ее гибкости и адаптивности к изменяющимся нуждам потребителей, обеспечивая при этом повышенную надежность энергоснабжения.

Распределенной энергетике в России начинают уделять все больше внимания. Это в основном связано с различными ее преимуществами, такими как снижение потерь электроэнергии в системе распределения, уменьшение колебаний напряжения, повышение надежности, улучшение качества электроэнергии, снижение затрат на энергию и, в конечном итоге, повышение удовлетворенности потребителей энергией.

Следует отметить, что понятия «микросеть» и тем более «интеллектуальная микроэнергосистема» в законодательно-нормативных документах в области развития электроэнергетики в России практически не встречаются. Для обеспечения возможности осуществления технологического присоединения сельских интеллектуальных микросетей к имеющейся системе электроснабжения без избыточных технических требований необходимо учесть особенности электроснабжения объектов российского сельского хозяйства и сельских домохозяйств путем внесения изменений в существующую нормативно-правовую базу (Лещинская Т.Б., Семичевский П.И., Белов С.И. Электроснабжение населенного пункта: методические рекомендации. М.: ФГОУ ВПО МГАУ. 2010. 148 с.) [26].

Выводы. Интеллектуальные микросети с участием ВИЭ должны стать в ближайшем будущем наиболее надежным, экономичным и экологичным способом электрификации сельских поселений, значительно сократить инвестиционные потребности по сравнению с традиционными и дорогостоящими решениями по расширению электросетей, что позволит стимулировать экономическое развитие в сельской местности, при этом сократить выбросы парниковых газов и загрязнение окружающей среды, поддерживать развитие местного бизнеса и рабочих мест.

Как показывают зарубежные источники, управляемые микросети с различным сочетанием ВИЭ успешно внедряются и используются во всем мире для надежного и эффективного энергоснабжения потребителей в сельской местности. Особенно активно этот процесс в последние годы идет в развивающихся странах. Многолетний зарубежный опыт показывает, что электрификация сельских потребителей с применением гибридных систем возобновляемой энергетике и созданием управляемых микросетей в

локальной местности позволяет обеспечить надежное и качественное электроснабжение сельскохозяйственных потребителей, включая домохозяйства, фермерские производства и сельские социальные и инфраструктурные организации.

В развитых и развивающихся странах успешное внедрение гибридной микрогенерации с ВИЭ неизбежно сопровождалось и сопровождается поддержкой государства в самых разнообразных формах: законодательной, финансовой, научно-технической, обучающей, просвещающей и прочими способами поддержки новой технологической платформы в системе энергообеспечения конечного потребителя.

В России, по сравнению с зарубежными странами, в связи с развитием микрогенерации переход от системы централизованного электроснабжения к системам распределенной генерации и в дальнейшем к микросетям с интеллектуальным управлением в настоящее время пока несколько затруднен, в первую очередь, в связи с отсутствием целенаправленной государственной политики и инструментов финансовой поддержки инициатив по созданию гибридных интеллектуальных микросетей. Вопрос надежного и эффективного энергоснабжения в значительной степени касается потребителей электроэнергии в сельской местности, где внедрение интеллектуальных микросетей в связи с широким распространением объектов микрогенерации, отсутствием опыта и возможностей финансирования сложных проектов, особенно необходимо.

Библиографический список

1. Karamov D.N., Ilyushin P.V., Suslov K.V. Electrification of Rural Remote Areas Using Renewable Energy Sources: Literature Review. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 16. 5881. DOI: 10.3390/en15165881.
2. Vincent S.A., Tahiru A., Lawal R.O. et al. Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: Assessing feasibility, efficiency, and socioeconomic impact. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 24. Iss. 02. 2190-2204. DOI: 10.30574/wjarr.2024.24.2.3515.
3. Anandhi R.J., Singh N., Palakurthy D. et al. Hybrid Solar-Hydropower Systems for Green Energy Production: A Comprehensive Analysis. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 552. P. 01123. DOI: 10.1051/e3sconf/202455201123.
4. Zebra E.I., van der Windt H.J., Nhumaio G. et al. A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. 111036. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111036.
5. Kumar G.B.A., Shivashankar. Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2021. Vol. 13. Iss. 1. 77-103. DOI: 10.1007/s40095-021-00399-9.
6. Javed M.S., Ma T., Jurasz J. et al. Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 148. 176-192. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.157.
7. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 349. 131347. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131347.
8. Li C., Zhou D., Wang H. et al. Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. *Energy*. 2020. Vol. 192. 116702. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116702.
9. Javed M.S., Zhong D., Ma T. et al. Hybrid pumped hydro and battery storage for renewable energy based power supply system. *Applied Energy*. 2020. Vol. 257. 114026. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114026.
10. Szymanski J.R., Zurek-Mortka M., Wojciechowski D. et al. Unidirectional DC/DC converter with voltage inverter for fast charging of electric vehicle batteries. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 18. 4791. DOI: 10.3390/en13184791.
11. Al-Ammar E.A., Habib H.U., Kotb K.M. et al. Residential community load management based on optimal design of standalone HRES with model predictive control. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. 12542-12572. DOI: 10.1109/access.2020.2965250.
12. Arbab-Zavar B., Palacios-Garcia E., Vasquez J. et al. Smart Inverters for Microgrid Applications: A Review. *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 5. 840. DOI: 10.3390/en12050840.
13. Hong Y.Y., Wei Y.H., Chang Y.R. et al. Fault Detection and Location by Static Switches in Microgrids Using Wavelet Transform and Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System. *Energies*. 2014. Vol. 7. Iss. 4. 2658-2675. DOI: 10.3390/en7042658.
14. Albarakati A.J., Boujoudar Y., Azeroual M. et al. Microgrid energy management and monitoring systems: A comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1097858.
15. García Vera Y.E., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Energy management in microgrids with renewable energy sources: a literature review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 18. 3854. DOI: 10.3390/app9183854.
16. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review

- of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. 402-411. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040.
17. Cárdenas P.A., Martínez M., Molina M.G. et al. Development of Control Techniques for AC Microgrids: A Critical Assessment. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 21. 15195. DOI: 10.3390/su152115195.
18. Ahmed K., Seyedmahmoudian M., Mekhilef S. et al. A Review on Primary and Secondary Controls of Inverter-interfaced Microgrid. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 969-985. DOI: 10.35833/mpce.2020.000068.
19. Zahraoui Y., Alhamrouni I., Mekhilef S. et al. Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 19. 10492. DOI: 10.3390/su131910492.
20. Lopez Alzate Y., Gómez-Luna E., Vasquez J.C. Innovative Microgrid Services and Applications in Electric Grids: Enhancing Energy Management and Grid Integration. *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 22. 5567. DOI: 10.3390/en17225567.
21. Irmak E., Kabalci E., Kabalci Y. Digital Transformation of Microgrids: A Review of Design, Operation, Optimization, and Cybersecurity. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 12. 4590. DOI: 10.3390/en16124590.
22. Maghami M.R., Mutambara A.G.O. Challenges associated with Hybrid Energy Systems: An artificial intelligence solution. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. 924-940. DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.195.
23. Uddin M., Mo H., Dong D. et al. Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 49. 101127. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101127.
24. Белов С.И., Дрига Н.Ф., Коняев Д.А. Развитие микрогенерации и микросетей в сельской местности для эффективной трансформации электроэнергетики на примере Краснодарского края // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2025. N3(279). С. 58-71. EDN: OI DF TK.
25. Загинайлов В.И., Стушкина Н.А., Лештаев О.В. и др. Повышение энергоэффективности производства продукции сельскохозяйственными предприятиями // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2022. N3(59). С. 54-64. DOI: 10.35694/YARCX.2022.59.3.008. EDN: JIMUS.
26. Виноградов А.В., Сейфуллин А.Ю. Анализ нормативных документов по вопросам создания интеллектуальных систем электроснабжения сельских потребителей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N1(42). С. 8-15. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-8-15. EDN: BBXWUQ.
- ### References
- Karamov D.N., Ilyushin P.V., Suslov K.V. Electrification of Rural Remote Areas Using Renewable Energy Sources: Literature Review. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 16. 5881. DOI: 10.3390/en15165881.
 - Vincent S.A., Tahiru A., Lawal R.O. et al. Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: Assessing feasibility, efficiency, and socioeconomic impact. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 24. Iss. 02. 2190-2204. DOI: 10.30574/wjarr.2024.24.2.3515.
 - Anandhi R.J., Singh N., Palakurthy D. et al. Hybrid Solar-Hydropower Systems for Green Energy Production: A Comprehensive Analysis. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 552. P. 01123. DOI: 10.1051/e3s-conf/202455201123.
 - Zebra E.I., van der Windt H.J., Nhumaio G. et al. A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. 111036. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111036.
 - Kumar G.B.A., Shivashankar. Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2021. Vol. 13. Iss. 1. 77-103. DOI: 10.1007/s40095-021-00399-9.
 - Javed M.S., Ma T., Jurasz J. et al. Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 148. 176-192. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.157.
 - Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 349. 131347. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131347.
 - Li C., Zhou D., Wang H. et al. Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. *Energy*. 2020. Vol. 192. 116702. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116702.
 - Javed M.S., Zhong D., Ma T. et al. Hybrid pumped hydro and battery storage for renewable energy based power supply system. *Applied Energy*. 2020. Vol. 257. 114026. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114026.
 - Szymanski J.R., Zurek-Mortka M., Wojciechowski D. et al. Unidirectional DC/DC converter with voltage inverter for fast charging of electric vehicle batteries. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 18. 4791. DOI: 10.3390/en13184791.
 - Al-Ammar E.A., Habib H.U., Kotb K.M. et al. Residential community load management based on opti-

- mal design of standalone HRES with model predictive control. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. 12542-12572. DOI: 10.1109/access.2020.2965250.
12. Arbab-Zavar B., Palacios-Garcia E., Vasquez J. et al. Smart Inverters for Microgrid Applications: A Review. *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 5. 840. DOI: 10.3390/en12050840.
 13. Hong Y.Y., Wei Y.H., Chang Y.R. et al. Fault Detection and Location by Static Switches in Microgrids Using Wavelet Transform and Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System. *Energies*. 2014. Vol. 7. Iss. 4. 2658-2675. DOI: 10.3390/en7042658.
 14. Albarakati A.J., Boujoudar Y., Azeroual M. et al. Microgrid energy management and monitoring systems: A comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1097858.
 15. García Vera Y.E., Dufó-López R., Bernal-Agustín J.L. Energy management in microgrids with renewable energy sources: a literature review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 18. 3854. DOI: 10.3390/app9183854.
 16. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. 402-411. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040.
 17. Cárdenas P.A., Martínez M., Molina M.G. et al. Development of Control Techniques for AC Microgrids: A Critical Assessment. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 21. 15195. DOI: 10.3390/su152115195.
 18. Ahmed K., Seyedmahmoudian M., Mekhilef S. et al. A Review on Primary and Secondary Controls of Inverter-interfaced Microgrid. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 969-985. DOI: 10.35833/mpce.2020.000068.
 19. Zahraoui Y., Alhamrouni I., Mekhilef S. et al. Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 19. 10492. DOI: 10.3390/su131910492.
 20. Lopez Alzate Y., Gómez-Luna E., Vasquez J.C. Innovative Microgrid Services and Applications in Electric Grids: Enhancing Energy Management and Grid Integration. *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 22. 5567. DOI: 10.3390/en17225567.
 21. Irmak E., Kabalci E., Kabalci Y. Digital Transformation of Microgrids: A Review of Design, Operation, Optimization, and Cybersecurity. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 12. 4590. DOI: 10.3390/en16124590.
 22. Maghami M.R., Mutambara A.G.O. Challenges associated with Hybrid Energy Systems: An artificial intelligence solution. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. 924-940. DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.195.
 23. Uddin M., Mo H., Dong D. et al. Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 49. 101127. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101127.
 24. Belov S.I., Driga N.F., Konyaev D.A. Development of microgeneration and microgrids in rural areas for effective transformation of the electric power industry using the example of the Krasnodar region. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2025. N3(279). 58-71 (In Russian). EDN: OI DF TK.
 25. Zaginaylov V.I., Stushkina N.A., Leshtayev O.V. et al. Energy efficiency improvement of manufacturing by agricultural enterprises. *Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2022. N3(59). 54-64 (In Russian). DOI: 10.35694/YARCX.2022.59.3.008. EDN: JIIMUS.
 26. Vinogradov A.V., Seyfullin A.Yu. Analysis of regulatory documents on the creation and operation of intelligent power supply systems for rural consumers. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2021. Vol. 68. N1(42). 8-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-8-15. EDN: BBXWUQ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All the authors have made an equivalent contribution to the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026

Статья принята к публикации 09.04.2026



Анализ применения способов и устройств для повышения энергоэффективности фотоэлектрических преобразователей

Алим Мансурович Арифов¹,

аспирант, e-mail: arifov.alim@inbox.ru;

Эскендер Алимович Бекиров¹,

доктор технических наук, профессор, e-mail: bekirov.e.a@cfuv.ru;

Леонид Юрьевич Юферев²,

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник,

e-mail: leouf@yandex.ru

¹Физико-технический институт «КФУ им. В.И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация.

Реферат. При эксплуатации фотоэлектрических станций, обеспечивающих электрическое питание потребителей агропромышленного комплекса, нередко происходит покрытие их поверхностей слоем льда и снега, а также они подвергаются непрерывному воздействию потенциально-индуцированной деградации. Данные эффекты, в том числе и климатические, оказывают существенное негативное влияние на энерговыработку фотоэлектрических модулей, тем самым ограничивая возможности потребителя. Для анализа экономического фактора предложенных способов и устройств проведена оценка снижения объема недовыработки фотоэлектрических преобразователей, оправдывающих затраченные ресурсы. (Цель исследования) Оценить энергоэффективность предложенных способов и устройств, направленных на поддержание эффективной работы фотоэлектрических модулей, обеспечивающих электрическое питание зернового терминала. (Материалы и методы) Проведен анализ предложенных способов и устройств, повышающих энергетическую эффективность работы фотопреобразователей. (Результаты и обсуждение) Проведена оценка величины ущерба, нанесенного зерновому терминальному комплексу, из-за отсутствия генерации вследствие попадания снега на поверхности фотоэлектрических модулей, а также – оценка ущерба от эффекта потенциально-индуцированной деградации фотоэлектрических модулей с 2015 по 2040 год. (Выводы) Полученные результаты показали значительную эффективность предложенных способов и устройств автоматической очистки снега и регенерации фотоэлектрических модулей, пострадавших от негативного воздействия потенциально-индуцированной деградации.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, энергоэффективность, нагрев фотоэлектрического модуля, деградация.

Для цитирования: Арифов А.М., Бекиров Э.А., Юферев Л.Ю. Анализ применения способов и устройств для повышения энергоэффективности фотоэлектрических преобразователей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N2. С. 115-122. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-115-122. EDN: UZDSGW.

Scientific article

Analysis of the Application of Methods and Devices to Improve the Energy Efficiency of Photovoltaic Converters

Alim M. Arifov¹,

postgraduate, e-mail: arifov.alim@inbox.ru;

Eskender A. Bekirov¹,

Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: bekirov.e.a@cfuv.ru;

Leonid Yu. Yuferev²,Dr.Sc.(Eng.), associate professor, chief researcher³,

e-mail: leouf@yandex.ru

¹Physics and Technology Institute «KFU V.I. Vernadsky», Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation;²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. During the operation of photovoltaic power plants providing electrical power to consumers of the agro-industrial complex, their surfaces are often covered with a layer of ice and snow, and they are also exposed to continuous exposure to potentially induced degradation. These effects, including climatic ones, have a significant negative impact on the energy output of photovoltaic modules, thereby limiting the consumer's capabilities. To analyze the economic factor of the proposed methods and devices, an assessment was made of reducing the amount of under-production of photovoltaic converters justifying the resources expended. (Research Purpose) The research purpose is evaluating the energy efficiency of the proposed methods and devices aimed at maintaining the efficient operation of photovoltaic modules providing electrical power to the grain terminal. (Materials and methods) The analysis of the proposed methods and devices that increase the energy efficiency of photoconverters is carried out. (Results and discussion) An assessment of the damage caused to the grain terminal complex due to the lack of generation due to snow on the surface of the photovoltaic modules was carried out, as well as damage from the effect of potentially induced degradation of photovoltaic modules from 2015 to 2040. (Conclusions) The results obtained showed the significant effectiveness of the proposed methods and devices for automatic snow cleaning and regeneration of photovoltaic modules affected by the negative effects of potentially induced degradation.

Keywords: photovoltaic module; energy efficiency; heating of the photovoltaic module; degradation.

For citation: Arifov A.M., Bekirov E.A., Yuferev L.Yu. Analysis of the application of methods and devices to improve the energy efficiency of photovoltaic converters. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 115-122 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-115-122. EDN: UZDSGW.

В настоящее время наблюдается растущий спрос на электроэнергию в ряде отраслей агропромышленного производства. Вместе с тем перебои в поставках энергии при электро-снабжении агропромышленных объектов приводят к существенным потерям в объеме производства и ухудшению качества продукции [1, 2]. Таким образом, повышение надежности энергоснабжения объектов АПК (на примере исследуемого зернового терминального комплекса) при применении способов и устройств для поддержания стабильной выработки электрической энергии фотоэлектрическими модулями (ФЭМ) и снижение энергопотребления от электрических сетей территориальной сетевой организации, является актуальной научной задачей.

В связи с этим были проведены исследования и анализ эффективности предложенных способов развития сельского хозяйства Республики Крым при эксплуатации электроэнергетического оборудования солнечной электростанции (СЭС) Николаевская (ООО «Капелла Солар»), обеспечивающей электрическое питание зернового терминального комплекса

(суммарная потребляемая мощность энергопринимающих устройств – 1,260 МВт).

Основное назначение и производственные задачи данного зернового терминала – это прием, очистка, сушка, хранение, кондиционирование и отгрузка зернового материала (рис. 1, 2).

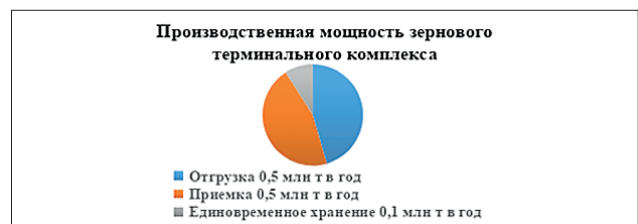


Рис. 1. Производственная мощность зернового терминала
Fig. 1. Production capacity of the grain terminal

На рисунке 3 показаны графики годового потребления электрической энергии зерновым терминальным комплексом и годового объема раздельного потребления электрической энергии от СЭС «Капелла Солар» и энергосистемы Республики Крым.

а



Рис. 2. Энергоемкость технологических процессов
Fig. 2. Energy intensity of technological processes

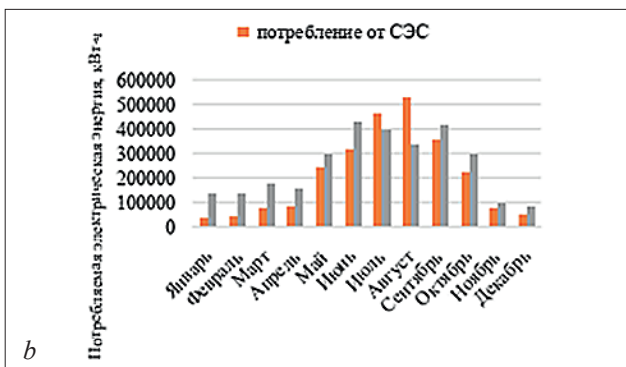
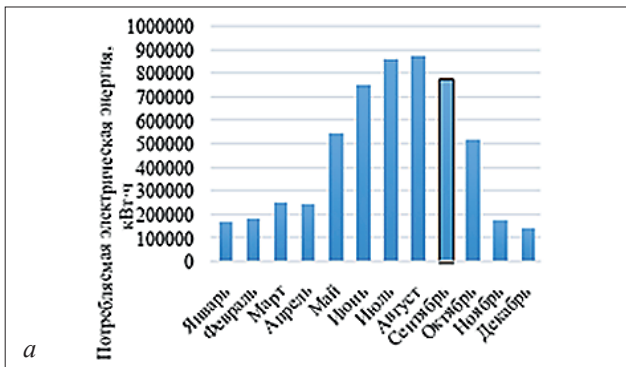


Рис. 3. Графики годового потребления электрической энергии: *a* – общее потребление зерновым терминальным комплексом от СЭС и ЭС Республики Крым; *b* – раздельное потребление зерновым терминальным комплексом от СЭС и ЭС Республики Крым

Fig. 3. Annual electricity consumption: *a* – total consumption by the grain terminal complex from the SPP and power grid of the Republic of Crimea; *b* – separate consumption by the grain terminal complex from the SPP and power grid of the Republic of Crimea

Цель исследования – осуществить анализ и исследовать способы и устройства, направленные на поддержание эффективной работы фотоэлектрических модулей в светлое время суток, обеспечивающих электрическое питание зернового терминала.

Материалы и методы. Для повышения энергетической эффективности работы фотоэлектрической станции, обеспечивающей питание зернового терминального комплекса, требуется усовершенствование основных компонентов фотоэлектрических установок

от воздействий внешних факторов – обледенения, оказывающего избыточный вес на ФЭМ, наличия снежного покрова, препятствующего возникновению фотоэффекта, а также деградации ФЭМ, снижающей объемы выработки генерации [3].

Один из предложенных способов повышения энергоэффективности фотоэлектрических станций – это нагрев фотоэлектрических модулей, покрывающих большие площади и расположенных на большой высоте (на кровле зданий) с ограниченным доступом, которые невозможно очистить силами обслуживающего персонала. При этом используется выпрямитель AC/DC, на вход которого подается напряжение от существующей электрической сети переменного тока (0,2-0,4 кВ и т.д.), а выпрямленное напряжение по кабельным линиям постоянного тока подается на фотоэлектрический модуль, контакты которого от источника питания постоянного тока соединяются (с соблюдением прямой полярности) с выводами ФЭМ [4].

Второй способ – регенерация ФЭМ от последствий ПИД-деградации, – который достигается с помощью электронного преобразователя [5-7]. Напряжение постоянного тока (до 1000 В) подается между выходом фотоэлектрической панели и алюминиевой опорной рамой, которая соединена с землей. Полярность напряжения противоположна той, которая вызывает явление ПИД-деградации. Таким образом, потенциал фотоэлектрической панели относительно земли увеличивается, а ток утечки устраняется путем реверсирования потока электронов к фотоэлементам [7, 8]. Система используется при отсутствии генерации в темное время суток или в случае укрытия панели материалом, не пропускающим солнечный свет.

Результаты и обсуждение. Для оценки эффективности способов и объемов потерь генерации показана выборка количества дней с «нулевой» генерацией из-за наличия снега за период с 2015 до 2026 года на СЭС Николаевская (табл. 1).

Вместе с тем проведен анализ финансового убытка зернового терминального комплекса за 23.02.2021 и 24.02.2021 из-за отсутствия генерации СЭС при наличии снега на поверхности ФЭМ и необходимого потребления электроэнергии от электрических сетей ресурсоснабжающей организации. На рисунке 4 показан график суточной нагрузки зернового терминала за 23 и 24 февраля 2021 года.

На рисунке 5 представлен накопительный график потребления электрической энергии зерновым терминалом у ресурсоснабжающей организации за 23 и 24 февраля 2021 года при отсутствия генерации

Table 1

Таблица 1

Дни с нулевой генерацией СЭС с 2015 до 2026 года
Dates with zero generation from solar power plants from 2015 to 2026 year

30.12.2015	19.01.2016	26.01.2017	23.01.2018	07.01.2019	07.02.2020	17.01.2021	12.02.2022	07.02.2023	16.01.2026
31.12.2015	22.01.2016	27.01.2017	24.01.2018	23.02.2019	08.02.2020	18.01.2021	13.02.2022	08.02.2023	17.01.2026
06.01.2015	23.01.2016	28.01.2017	25.01.2018	24.02.2019	09.02.2020	19.01.2021			02.02.2026
07.01.2015	24.01.2016	29.01.2017	26.01.2018			13.02.2021			
		30.01.2017	26.02.2018			14.02.2021			
						23.02.2021			
						24.02.2021			

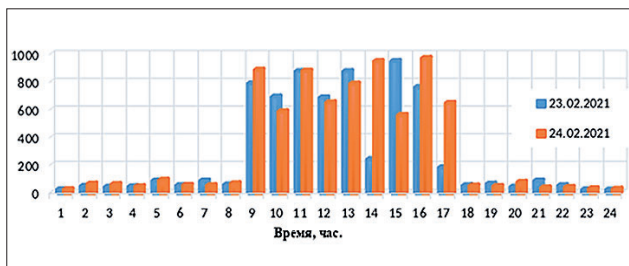


Рис. 4. График суточной почасовой нагрузки зернового терминального комплекса за 23 и 24 февраля 2021 года
Fig. 4. Daily hourly load chart of the grain terminal complex for 23.02.2021 and 24.02.2021

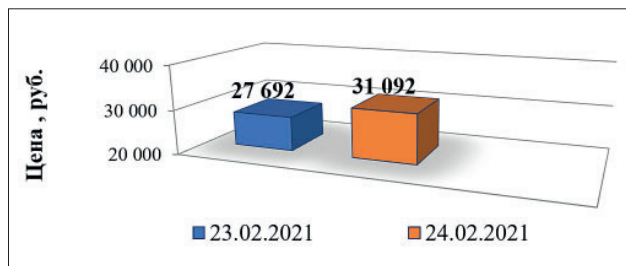


Рис. 6. Стоимость электроэнергии за 23.02.2021 для потребителя составила 27692 руб.; за 24.02.2021 – 31092 руб.
Fig. 6. Cost of electrical energy for the consumer for 23.02.21 was rub 27692; for 24.02.2021 was rub 31092 rub

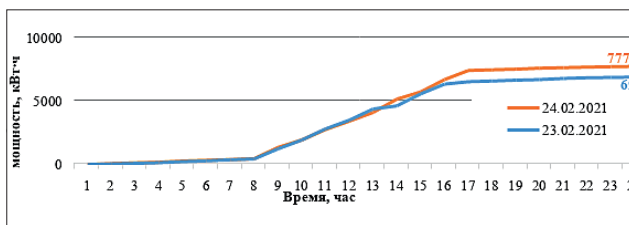


Рис. 5. Объем потреблённой электрической энергии (кВт·ч) за 23.02.2021 и 24.02.2021
Fig. 5. Consumed electric energy (kWh) for 23.02.2021 and 24.02.2021

СЭС Николаевская вследствие укрытия поверхностей ФЭМ снегом.

На основании данных о потреблении электрической энергии выполнен расчет финансовых средств, затраченных на ее приобретение зерновым терминалом у ресурсоснабжающей организации при отсутствии генерации у СЭС Николаевская из-за укрытия ФЭМ снегом (стоимость электрической энергии в феврале 2021 года составила 4 руб./кВт·ч) [9].

Рассмотрены потери генерации из-за эффекта ПИД-деградации ФЭМ на примере площадки СЭС Николаевская (ООО «Капелла Солар») с суммарной установленной мощностью 20,05 МВт. Одновременно произведен расчет снижения объемов выработки СЭС из-за эффекта поляризационно-индуцированной деградации фотоэлектрических модулей за период с 2015 по 2040 год.

Для определения прогнозируемой мощности солнечных панелей через N лет (с 2016 по 2022 год) произвели необходимый расчет [10, 11]:

$$D\% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100, \quad (1)$$

где $D\%$ – процент деградации ФЭМ, %;

W_1 – фактическая выработка за предыдущий год, кВт·ч;

W_2 – фактическая выработка за последующий год, кВт·ч.

Анализ эффективности работы СЭС «Капелла Солар» за расчетный период с 2015 по 2040 год (25 лет) с учетом данных выработки и потерь генерации представлен в *таблице 2*.

При снижении мощности объекта генерации СЭС «Капелла-Солар» из-за ПИД-деградации уменьшается длительность энергоснабжения зернового терминального комплекса в светлое время суток, и пиковые часы нагрузки зернового терминала приходятся на период с 08:00 до 18:00 (*рис. 7*). Таким образом, СЭС «Капелла-Солар» первого апреля 2015 года при нулевой облачности обеспечивала 90% потребности зернового терминала электрической энергией.

Для сравнения графиков потребления электроэнергии зерновым терминальным комплексом и ее выработки СЭС «Капелла Солар» через 25 лет спрогнозирован график почасовой нагрузки

Table 2		Таблица 2		
Данные эффективности работы СЭС с 2015 по 2040 год / SPP performance data from 2015 to 2040 year				
№	Год	Суммарная выработка, кВт·ч	Потери генерации СЭС, кВт·ч	
1	2015	27005483,0	810164,4	
2	2016	26195318,5	785859,5	
3	2017	25409458,9	1016378,3	
4	2018	24393080,6	975723,2	
5	2019	23417357,3	936694,2	
6	2020	22480663,0	674419,8	
7	2021	21629243,1	1081462,1	
8	2022	20547781,0	821911,2	
9	2023	19725869,7	986293,4	
10	2024	18739576,3	749583,0	
11	2025	17989993,2	719599,7	
12	2026	17270393,5	690815,7	
13	2027	16579577,7	663183,1	
14	2028	15916394,6	636655,7	
15	2029	15279738,8	458392,1	
16	2030	14821346,7	592853,8	
17	2031	14228492,8	569139,7	
18	2032	13659353,1	546374,1	
19	2033	13112979,0	524519,1	
20	2034	12588459,8	503538,3	
21	2035	12084921,4	483396,8	
22	2036	11601524,5	464060,9	
23	2037	11137463,6	445498,5	
24	2038	10691965,0	427678,6	
15	2039	10264286,4	410571,4	
26	2040	9853715,0	394148,6	

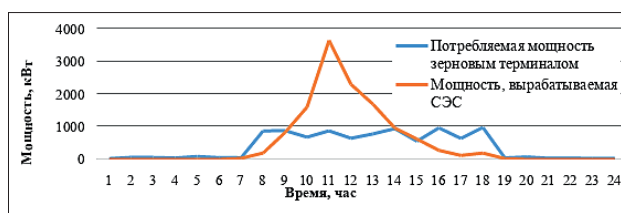
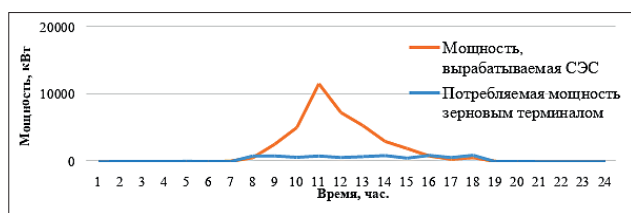


Рис. 7. Графики почасовой выработки СЭС «Капелла Солар» и потребления электроэнергии зерновым терминалом за 01.04.2015

Fig. 7. Hourly generation graph of the Capella Solar power plant and consumption of the grain terminal for 01.04.2015

Рис. 8. Графики прогнозируемой почасовой мощности СЭС «Капелла Солар» и нагрузки зернового терминала на апрель 2040 года

Fig. 8. Projected hourly graph of the Capella Solar power plant capacity and the grain terminal load for april 2040 year

за аналогичный 2024 год (с идентичным уровнем излучения в 2040 году), но с учетом динамики снижения мощности (рис. 8). Из графика следует, что из-за деградации СЭС «Капелла-Солар» в 2040 году – в день с аналогичными метеоданными и протяжённостью светового дня – СЭС на 70% обеспечит покрытие потребления электрической энергии зерновым терминалом.

Сравнительный анализ объема выработки электрической энергии СЭС «Капелла Солар» показал ее прогнозируемое снижение на 40% в 2040 году по сравнению с 2015 годом при неизменной величине объема потребления (рис. 9).

Учитывая уменьшение объема выработки СЭС «Капелла Солар» с 2015 по 2040 год вследствие деградации ФЭМ, потребление электрической энергии зерновым терминальным комплексом от сетей тер-

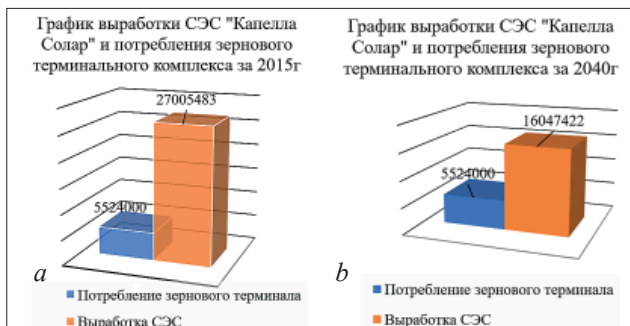


Рис. 9. Графики выработки СЭС «Капелла Солар» и потребления зернового терминального комплекса: а – за 2015 год; б – за 2040 год

Fig. 9. Annual schedule of generation of the Capella Solar power plant and consumption of the grain terminal complex: a – for 2015; b – for 2040

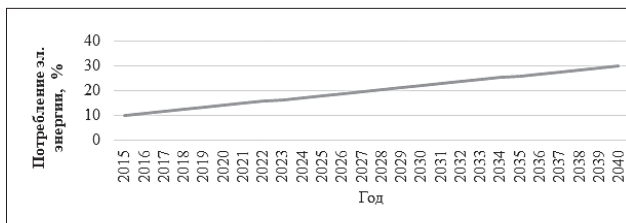


Рис. 10. Динамика роста потребления электрической энергии зерновым терминалом

Fig. 10. Dynamics of increase in electric energy consumption

Проведен анализ ущерба от эффекта ПИД-деградации ФЭМ, согласно которому с 2015 по 2040 год прогнозируется сокращение объемов генерации СЭС. Вместе с тем на 20 % снизится объем электрической энергии, переданной от шин солнечной электростанции

Table 3		Таблица 3	
Прогнозируемая окупаемость предложенных устройств / Estimated ROI data for proposed devices			
·Общее количество модулей - 60 тыс. ед. (мощность – 330 Вт/модуль)			
·Общее количество инверторов – 18 ед.			
Регенерация модулей от последствий ПИД		Устройство плавки льда и снега на ФЭМ	
Себестоимость одного, разработанного преобразователя мощностью 100 Вт с напряжением 1000 В	250 руб.	Себестоимость одного разработанного устройства	8 тыс. руб.
Отношение себестоимости преобразователь-модуль	2,5 руб.	Общее количество устройств	18 шт.
Себестоимость преобразователя для регенерации ФЭМ на 1 кВт мощности	7,5 руб.	Общая стоимость устройств.	144 тыс. руб.
Стоимость расходных материалов для подключения всех преобразователей	150 тыс. руб.	Стоимость расходных материалов для подключения устройств	50 тыс. руб.
Общее количество преобразователей	600 шт.	Трудозатраты на монтаж всех устройств	150 чел./ч
Расходные материалы при подключении преобразователей для регенерации модулей	75 тыс. руб.	Стоимость монтажных работ	75 тыс. руб.
Трудозатраты на монтаж преобразователей для регенерации модулей	300 чел./ч	Суммарные затраты	269 тыс. руб.
Общая стоимость монтажных работ	150 тыс. руб.	Прогнозируемая окупаемость устройства, включая процесс плавки, будет достигнута через 10 циклов (дней)	
Суммарные затраты	375 тыс. руб.		
Прогнозируемая окупаемость устройств осуществится через 6 месяцев работы			

риториальной сетевой организации в этот период увеличится (на 20%) в случае дальнейшего влияния потенциально-индуцированной деградации на СЭС с установленной мощностью 20,5 МВт.

Тенденция роста потребления электрической энергии зерновым терминалом от сетей ресурсоснабжающей организации вследствие ПИД-деградации ФЭМ за 25 лет показана на рисунке 10.

Данные по прогнозируемой окупаемости предложенных устройств представлены в таблице 3.

Выводы. Величина ущерба зернового терминального комплекса ввиду отсутствия генерации 23 и 24 апреля 2021 года вследствие наличия снега на поверхности ФЭМ СЭС Николаевская составила 60 тысяч рублей.

к зерновому терминальному комплексу (интервал 25 лет). Прогнозируемая окупаемость устройства при осуществлении процесса плавки снега наступит через 10 циклов, а ожидаемая окупаемость устройств регенерации ФЭМ – через 6 месяцев непрерывного процесса регенерации в темное время суток.

Библиографический список

1. Даус Ю.В., Юдаев И.В. Оценка ресурса солнечной энергии территории объекта АПК // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2024. N3(77). С. 137-145. DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-137-145. EDN: QXQWTW1.
2. Тихомиров Д.А., Виноградов А.В. Научные про-

- блемы и практические решения по эффективному и стабильному энергообеспечению объектов животноводства // *Техника и технологии в животноводстве*. 2022. N2(46). С. 37-45. DOI: 10.51794/27132064-2022-2-37. EDN: ZUZTVTD.
3. Tyagi V.V., Rahim N.A.A., Rahim N.A., et al. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 20. 443-461. DOI: 10.1016/j.rser.2012.09.028. EDN: SSDZJV.
 4. Арифов А.М., Бекиров Э.А., Юферов Л.Ю. Удаление льда и снега с поверхности фотоэлектрических модулей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N1. С. 115-121. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-1-115-121. EDN: WXCTMF.
 5. Aitola K., Markkanen M., Hou X., et al. Encapsulation of commercial and emerging solar cells with focus on perovskite solar cells. *Solar Energy*. 2022. Vol. 237. 264-283. DOI: 10.1016/j.solener.2022.03.060. EDN: KHKAIE.
 6. Landa-Pliquet M., Béjat T., Serasset M., et al. Enhancing photovoltaic modules encapsulation: Optimizing lamination processes for Polyolefin Elastomers (POE) through crosslinking behavior analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2024. Vol. 267. 112725. DOI: 10.1016/j.solmat.2024.112725.
 7. Арифов А.М., Бекиров Э.А. Методы решения проблем полярязационно-индуцированной деградации фотогальванических элементов // *Строительство и техногенная безопасность*. 2022. N27(79). С. 89-100. EDN: TXZPNI.
 8. Rahmatmand A., Stephen J.H., Oosthuizen P.H. An experimental investigation snow removal photovoltaic solar panels electrical heating. *Solar Energy*. 2018. 811-826. DOI: 10.1016/j.solener.2018.07.015.
 9. Ogbolumani O.A., Nwulu N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: systematic review on smart systems. *Sustainability*. 2022. N14. 10920. DOI: 10.3390/su141710920.
 10. Noord V.M., Landelius T., Andersson S. Snow induced PV loss modeling using production. *Energies*. 2021. N14. 1574. DOI: 10.3390/en14061574.
 11. Rob W. Andrews, Andrew Pollard, Joshua M. Pearce. The effects of snowfall on solar photovoltaic performance. *Solar Energy*. 2013. 84-97. DOI: 10.1016/j.solener.2013.02.014.
 12. Ogbolumani O.A., Nwulu N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: systematic review on smart systems. *Sustainability*. 2022. N14. 10920. DOI: 10.3390/su141710920.
- ### References
1. Daus Yu.V., Yudaev I.V. Solar energy resource assessment of the agricultural industrial complex enterprise territory. Proceedings of St. Petersburg State Agrarian University. Vol. 77. N3. 137-145 (In Russian). DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-137-145. EDN: QXQTWI.
 2. Tikhomirov D.A., Vinogradov A.V. Scientific problems and practical solutions for efficient and stable energy supply of livestock facilities. *Technique and Technologies in Animal Husbandry*. 2022. N2(46). 37-45 (In Russian). DOI: 10.51794/27132064-2022-2-37. EDN: ZUZTVTD.
 3. Tyagi V.V., Rahim N.A.A., Rahim N.A., et al. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 20. 443-461. DOI: 10.1016/j.rser.2012.09.028. EDN: SSDZJV.
 4. Arifov A.M., Bekirov E.A., Yuferev L.Yu. Removing ice and snow from the Surface of photovoltaic modules. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N1. 115-121 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-1-115-121. EDN: WXCTMF.
 5. Aitola K., Markkanen M., Xou X., et al. Encapsulation of commercial and emerging solar cells with focus on perovskite solar cells. *Solar Energy*. 2022. Vol. 237. 264-283. DOI: 10.1016/j.solener.2022.03.060. EDN: KHKAIE.
 6. Landa-Pliquet M., Béjat T., Serasset M., et al. Enhancing photovoltaic modules encapsulation: Optimizing lamination processes for Polyolefin Elastomers (POE) through crosslinking behavior analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2024. Vol. 267. 112725. DOI: 10.1016/j.solmat.2024.112725.
 7. Arifov A.M., Bekirov E.A. Methods for solving problems of polarization-induced degradation of photovoltaic cells. *Construction and technogenic safety*. 2022. N27(79). 89-100 (In Russian). EDN: TXZPNI.
 8. Rahmatmand A., Stephen J. Harrison, Oosthuizen P.H. An experimental investigation of snow removal from photovoltaic solar panels by electrical heating. *Solar Energy* 171. 2018. 811-826. DOI: 10.1016/j.solener.2018.07.015.
 9. Ogbolumani O.A., Nwulu N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: systematic review on smart systems. *Sustainability*. 2022. N14. 10920. DOI: 10.3390/su141710920.
 10. Van Noord. M., Landelius. T., Andersson S. Snow Induced PV Loss Modeling Using Production-Data Inferred PV System Models. *Energies*. 2021. N14. 1574. DOI: 10.3390/en14061574.
 11. Rob W. Andrews, Andrew Pollard, Joshua M. Pearce.

The effects of snowfall on solar photovoltaic performance. *Solar Energy*. 2013. 84-97. DOI: 10.1016/j.solener.2013.02.014.

12. Ogbolumani O.A., Nwulu N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: systematic review on smart systems. *Sustainability*. 2022. N14. 10920. DOI: 10.3390/su141710920.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Арифов А.М. – сбор и анализ материалов по теме исследования, разработка и испытание технических решений, составление начального варианта статьи;

Бекиров Э.А. – научное руководство, формулирование основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста;

Юфев Л.Ю. – определение методологии исследования, критический анализ, итоговая доработка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Arifov A. M. – collection and analysis of research materials, development and testing of technical solutions, writing the initial manuscript;

Bekirov E. A. – scientific supervision, formulation of the main goals and objectives of theoretical research, text revision;

Yuferev L.YU. – definition of research methodology, critical analysis, and final revision of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 03.04.2026

Статья принята к публикации 15.05.2026



Компьютерное моделирование многофазной ветроэнергетической установки для электроснабжения объектов агропромышленного комплекса

Артур Валерьевич Махиянов¹,

ассистент, e-mail: artur28061998@mail.ru;

Роберт Радилович Саттаров¹,

доктор технических наук, профессор;

Айнур Иршатович Азнагулов²,

кандидат технических наук, младший научный сотрудник

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация;

²Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Российская Федерация

Реферат. Современная энергетика агропромышленного комплекса отличается устойчивой тенденцией к интеграции возобновляемых источников энергии, среди которых ветроэнергетика занимает одно из ключевых мест как средство снижения затрат и повышения энергетической независимости сельскохозяйственных предприятий. Представлены результаты моделирования в среде MATLAB Simulink многофазной ветроэнергетической установки, предназначенной для электроснабжения объектов агропромышленного комплекса (фермы, теплицы, насосные станции орошения и другие). (Цель исследования) Изучить возможность стабилизации выходного напряжения многофазной ветроэнергетической установки при низких скоростях ветра. (Материалы и методы) Использовали в качестве основного метода исследования компьютерное моделирование в среде MATLAB Simulink, что дает возможность проанализировать различные режимы работы как при низких, так и нормальных скоростях ветра. (Результаты и обсуждение) Разработали и смоделировали ветроустановку, позволяющую стабилизировать выходное напряжение к текущему ветровому потенциалу и уровню нагрузки потребителей агропромышленного комплекса. Показали при моделировании три основных режима работы: при нормальной скорости ветра используется параллельное соединение трех выпрямителей; при снижении скорости в два раза схема переключается на последовательное соединение двух выпрямителей; при снижении скорости в четыре раза задействуется последовательное соединение трех выпрямителей. Подтвердили результатами моделирования, что предложенная конфигурация ветроустановки с реконфигурируемой схемой выпрямления позволяет эффективно стабилизировать напряжение в широком диапазоне изменений скорости ветра, повышая надежность и энергоэффективность автономных энергосистем агропромышленного комплекса для корректной работы электроприводов, систем вентиляции, доильного оборудования, насосов и холодильных установок. (Выводы) Констатировали перспективность применения ветроэнергетических установок для уменьшения зависимости сельскохозяйственных предприятий от сетевого электроснабжения и традиционных видов топлива.

Ключевые слова: энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, ветроэнергетическая установка, стабилизация напряжения, магнитоэлектрический генератор, агропромышленный комплекс.

Для цитирования: Махиянов А.В., Саттаров Р.Р., Азнагулов А.И. Компьютерное моделирование многофазной ветроэнергетической установки для электроснабжения объектов агропромышленного комплекса // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №2. С. 123-129. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-123-129. EDN: VVFIY.

Scientific article

Computer Simulation of a Multiphase Wind Power Plant for Power Supply of Agro-Industrial Facilities

Arthur V. Makhiyanov¹,
assistant, e-mail: artur28061998@mail.ru;
Robert R. Sattarov¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor;
Aynur I. Aznagulov²,
Ph.D.(Eng), research assistant

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation;

²Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russian Federation

Abstract. *The modern energy sector of the agro-industrial complex is characterized by a steady trend towards the integration of renewable energy sources, among which wind energy occupies one of the key places as a means of reducing costs and increasing the energy independence of agricultural enterprises. The results of modeling in the MATLAB Simulink environment of a multiphase wind power plant intended for power supply of agro-industrial facilities (farms, greenhouses, irrigation pumping stations, etc.) are presented. (Research purpose) The research purpose is studying the possibility of stabilizing the output voltage of a multiphase wind power plant at low wind speeds. (Materials and methods) Used computer simulation in the MATLAB Simulink environment as the main research method, which makes it possible to analyze various operating modes both at low and normal wind speeds. (Results and discussion) We have developed and modeled a wind turbine that allows us to stabilize the output voltage to the current wind potential and the load level of consumers of the agro-industrial complex. Three main operating modes were shown during simulation: at normal wind speed, a parallel connection of three rectifiers is used; when the speed is reduced by two times, the circuit switches to a serial connection of two rectifiers; when the speed is reduced by four times, a serial connection of three rectifiers is activated. Confirmed by the simulation results that the proposed configuration of a wind turbine with a reconfigurable rectification circuit makes it possible to effectively stabilize the voltage in a wide range of wind speed changes, increasing the reliability and energy efficiency of autonomous power systems of the agro-industrial complex for the correct operation of electric drives, ventilation systems, auxiliary equipment, pumps and refrigeration units. (Conclusions) The prospects of using wind power plants to reduce the dependence of agricultural enterprises on mains power supply and traditional fuels were described.*

Keywords: *energy efficiency, renewable energy sources, wind energy, wind power plant, voltage stabilization, magnetoelectric generator, agro-industrial complex.*

For citation: Makhiyanov A.V., Sattarov R.R., Aznagulov A.I. Computer simulation of a multiphase wind power plant for power supply of agro-industrial facilities. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 123-129 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-123-129. EDN: VVFIY.

Современная энергетика агропромышленного комплекса отличается устойчивой тенденцией к интеграции возобновляемых источников энергии, среди которых ветроэнергетика занимает одно из ключевых мест как средство снижения затрат и повышения энергетической независимости сельскохозяйственных предприятий [1]. Рост эффективности и надежности ветроэнергетических установок (ВЭУ), используемых для питания ферм, пастек, тепличных комплексов, насосных станций орошения и холодильных установок, – актуальная задача, напрямую влияющая на устойчивость технологических процессов и экономическую целесообразность внедрения таких систем.

Одним из основных вызовов при эксплуатации ВЭУ на объектах АПК служит существенная нестабильность первичного энергоресурса – скорости ветра, особенно характерная для сельских и удаленных районов [2]. Это приводит к значительным колебаниям частоты вращения ротора генератора и, как следствие, нестабильности выходных электрических параметров, что критично для электроприводов, систем вентиляции, доильного и насосного оборудования, требующих определенного диапазона напряжения для надежной работы [3].

Перспективное направление решения данной проблемы – применение многофазных электрических генераторов [4]. По сравнению с традицион-

ными трехфазными машинами, генераторы с увеличенным числом фаз, в частности девятифазные, обладают рядом преимуществ, важных для АПК: повышенной отказоустойчивостью (сохранение работоспособности при выходе из строя части фаз); снижением пульсаций электромагнитного момента и возможностью распределения мощности по нескольким независимым каналам, что упрощает питание разнородных сельскохозяйственных нагрузок и повышает живучесть системы [5].

Однако потенциал таких генераторов не может быть полностью реализован без разработки специализированных систем силовой электроники, адаптирующихся к изменяющимся режимам работы и профилю нагрузок агропредприятия. Особую значимость для АПК приобретает задача стабилизации выходного напряжения генератора в широком диапазоне скоростей вращения, чтобы обеспечить непрерывное питание жизненно важных потребителей (насосы водоснабжения, системы микроклимата в животноводческих помещениях, оборудование хранения и переработки продукции) даже при существенных изменениях ветровой обстановки [6].

Стандартные системы выпрямления с фиксированной конфигурацией, как правило, не обеспечивают эффективную работу при многократных изменениях скорости ветра: при низких скоростях вращения выходное напряжение падает ниже допустимого уровня для корректной работы электрооборудования, а при высоких возникают риски перенапряжений и перегрева силовых элементов. В условиях АПК это приводит к вынужденным простоям технологического оборудования или необходимости избыточного резервирования за счет дизель-генераторов и сетевого питания. Поэтому существует объективная потребность в создании адаптивных систем преобразования энергии, способных динамически изменять свою структуру в зависимости от текущих метеоусловий и режима работы сельскохозяйственных потребителей [7].

Рассматривается решение указанной проблемы для АПК путем разработки и моделирования многофазной ВЭУ на основе девятифазного магнитоэлектрического генератора с реконфигурируемой схемой выпрямления, предназначенной для электроснабжения сельскохозяйственных объектов. В качестве главного метода исследования использовали компьютерное моделирование в среде *MATLAB Simulink*, что дает возможность детально проанализировать режимы работы при различных скоростях ветра и оценить пригодность предложенного технического решения для практического применения в условиях АПК.

Цель исследования – изучить возможность стабилизации выходного напряжения многофазной ветроэнергетической установки при низких скоростях ветра.

Материалы и методы. В качестве основного метода исследования использовали компьютерное моделирование в среде *MATLAB Simulink*, что позволяет проанализировать различные режимы работы как при низких, так и нормальных скоростях ветра.

Результаты и обсуждение. В основу многофазной ВЭУ, изображенной на *рисунке 1*, легли технические решения, описанные в работе [8]. Установка содержит ветроколесо (или, например, ротор Дарье), механически связанное с девятифазным синхронным генератором с постоянными магнитами. Выводы трех трехфазных обмоток A1A2A3, B1B2B3, C1C2C3 генератора подведены к блоку измерений напряжений и коммутаций (БИНК), включающему три выпрямителя, измеритель напряжения, формирователь сигналов, коммутирующее устройство и преобразователь постоянного тока. БИНК подключен к аккумулятору или через инвертор для питания нагрузки [8].

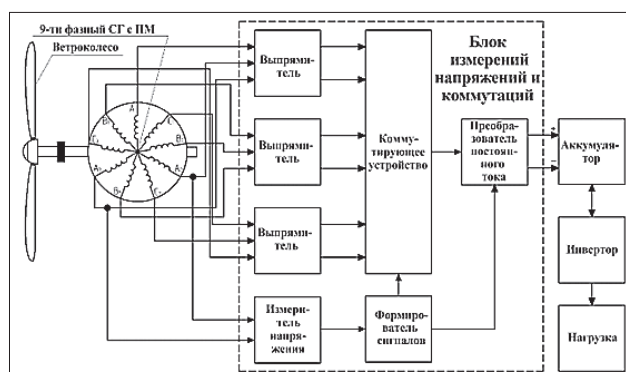


Рис. 1. Структурная схема многофазной ветроэнергетической установки [8]

Fig. 1. Structural diagram of the multiphase wind power installation [8]

Рассмотрим принцип действия многофазной ветроэнергетической установки. В БИНК измеритель напряжения, подключенный к одной из трехфазных обмоток генератора, фиксирует изменение напряжения при уменьшении или увеличении скорости ветра. Далее коммутирующее устройство при соответствующем сигнале от формирователя сигналов соединяет выводы выпрямителей так, что они оказываются подключенными последовательно или параллельно [9].

В случае нормальной скорости ветра коммутирующее устройство соединяет выводы выпрямителей параллельно [10]. При этом выходное напряжение

имеет нормальное значение, а полный ток равен утроенному нормальному току одного выпрямителя. Выводы коммутирующего устройства подключены к аккумулятору, который через инвертор может обеспечить питание нагрузки. Этот режим обеспечивает максимальную мощность установки при сохранении нормального напряжения.

При небольшом снижении скорости ветра выводы одного выпрямителя переводятся в режим холостого хода, а выводы двух других соединяются последовательно [8]. Выходное напряжение становится равным двойному выходному напряжению одного выпрямителя. Обеспечивается стабилизация напряжения на аккумуляторе.

Если отмечается дальнейшее уменьшение скорости ветра напряжение генератора снижается, формирователь сигналов подаст импульс на коммутирующее устройство соединить все три выпрямителя последовательно [8]. Выходное напряжение повысится до нормального значения, а ток уменьшится до тока одного выпрямителя. Мощность установки сокращается, но остается максимально возможной при данной скорости ветра.

При повышении скорости ветра в БИНК обеспечивается обратное переключение на параллельную работу трех выпрямителей [8]. Во всех режимах установка сохраняет близкий к нормальному уровень напряжения и выдает максимально возможную мощность при данной скорости ветра.

В среде *MATLAB Simulink* разработали комплексную компьютерную модель исследуемой многофазной ветроустановки (рис. 2). Моделирование продолжает ряд исследований, представленных в научных трудах [9-11].

Электрическая часть трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами описывается системой уравнений, связанных с ротором [11]:

$$\begin{aligned} u_d &= L_d \frac{d}{dt} i_d + R i_d - L_q p \omega_r i_q; \\ u_q &= L_q \frac{d}{dt} i_q + R i_q - L_d p \omega_r i_d + \lambda p \omega_r; \\ T_e &= 1,5p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \end{aligned}$$

где u_d, u_q – проекции напряжения статора на оси d и q , В;

L_d, L_q – индуктивности статора по осям d и q , Гн;

i_d, i_q – проекции тока статора на оси d и q , А;

R – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

p – число пар полюсов;

ω_r – угловая частота вращения ротора, рад/с;

λ – магнитный поток постоянных магнитов, сцепленный с обмоткой статора, Вб;

T_e – электромагнитный момент, Нм.

Выразим проекции токов статора на оси d и q [11]:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q,$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}.$$

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору.

Table		Таблица	
Параметры блоков «Three-Phase Programmable Voltage Source» Parameters of the «Three-Phase Programmable Voltage Source» blocks			
Параметры	Значение		
Амплитуда U первого блока	220 В		
Фазовый сдвиг первого блока	[0, 120, 240] град.		
Частота второго блока	50 Гц		
Амплитуда U второго блока	220 В		
Фазовый сдвиг второго блока	[30, 150, 270] град.		
Частота второго блока	50 Гц		
Амплитуда U третьего блока	220 В		
Фазовый сдвиг третьего блока	[60, 180, 300] град.		
Частота третьего блока	50 Гц		

Функцию трехфазных источников напряжения, имитирующих работу девятифазной обмотки синхронного генератора с постоянными магнитами, выполняют три программно-управляемых блока *Three-Phase Programmable Voltage Source*. Их ключевые параметры приведены в таблице. Для точного контроля электроэнергетических параметров в модели предусмотрены измерительные блоки *Three-Phase V-I Measurement*, которые фиксируют трехфазное напряжение на выходе каждого источника [11]. Далее для перехода к действующим значениям напряжения используются блоки измерения среднеквадратичного значения *RMS* [10].

Преобразование переменного напряжения в постоянное осуществляется тремя мостовыми выпрямителями, каждый из которых реализован на базе шести диодных элементов *Diode* [10, 11]. Сглаживающий конденсатор емкостью 1 мФ, смоделированный с помощью блока *Series RLC Branch*, позволяет подавлять пульсации выпрямленного напряжения, обеспечивая на выходе установки стабильный постоянный сигнал [10, 11]. С помощью этого же блока реализована активная нагрузка величиной 1000 Ом.

Результаты моделирования наглядно подтверждают высокую эффективность предложенной схемы. В первом режиме работы, соответствующем

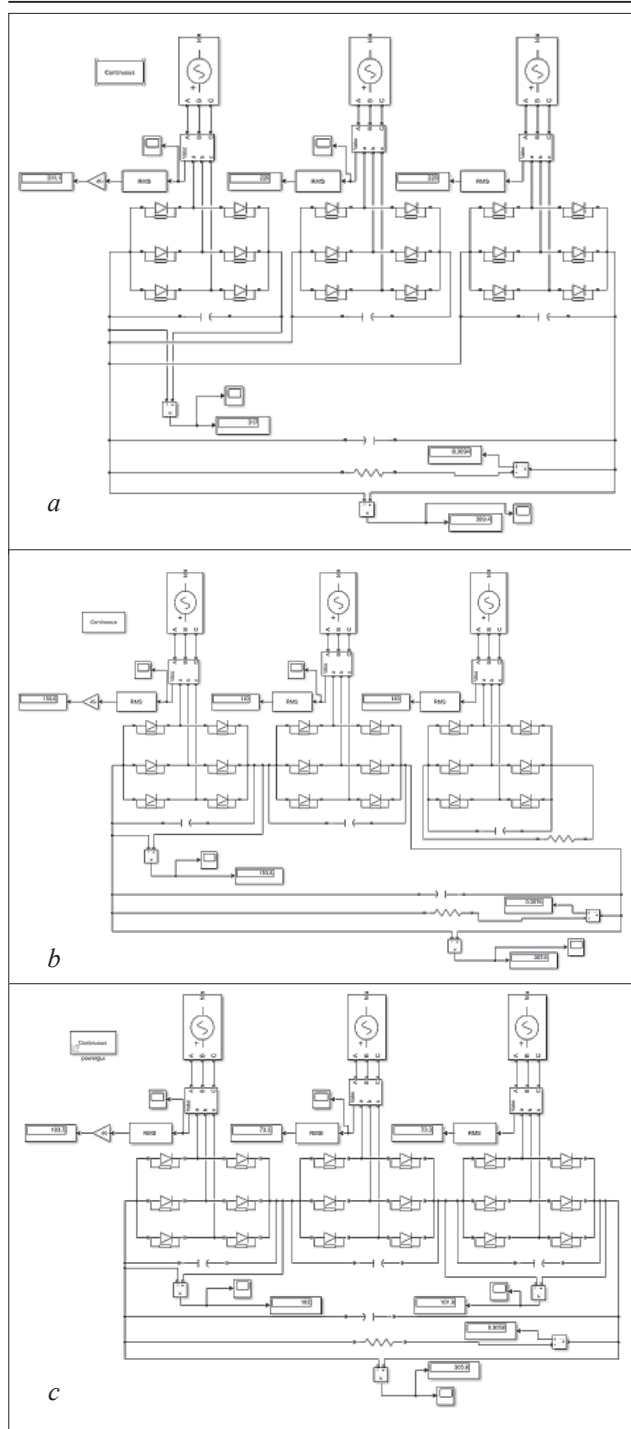


Рис. 2. Компьютерное моделирование многофазной ветроэнергетической установки в MATLAB (Simulink): a – параллельное соединение трех выпрямителей при нормальной скорости ветра; b – последовательное соединение двух выпрямителей при снижении скорости в два раза; c – последовательное соединение трех выпрямителей при снижении скорости в четыре раза
Fig. 2. Computer simulation of a multiphase wind power installation in MATLAB (Simulink): a – parallel connection of three rectifiers at normal wind speed; b – series connection of two rectifiers when the speed is reduced by half; c – series connection of three rectifiers when the speed is reduced by four

нормальной скорости ветра, когда каждая обмотка генератора вырабатывает действующее напряжение 220 В, параллельное соединение трех выпрямителей обеспечивает стабильное выходное напряжение величиной 309,4 В (рис. 2а, 3). Этот режим характеризуется максимальной выходной мощностью установки, равной 95,7 Вт.

При моделировании условий ослабления ветрового потока, когда его скорость падает в два раза, а напряжение на обмотках пропорционально снижается до 110 В, реализуется следующее подключение: один выпрямитель отключается, а два других соединяются последовательно (рис. 2b). Моделирование фиксирует, что выходное напряжение при этом стабилизируется на уровне 307,5 В (рис. 3), мощность при этом равна 94,6 Вт.

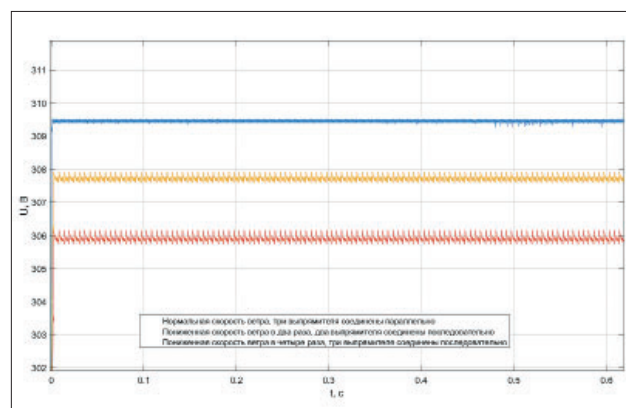


Рис. 3. Выходное напряжение ветроустановки при различных скоростях ветра

Fig. 3. Output voltage of the wind installation at different wind speeds

Максимальная эффективность предложенной схемы проявляется при критическом снижении скорости ветра вчетверо относительно номинала. Напряжение на обмотках генератора падает до 55 В, однако последовательное соединение всех трех выпрямителей позволяет системе поднять и стабилизировать выходное напряжение до 305,8 В (рис. 2с, 3). Это доказывает, что установка сохраняет работоспособность и способность выдавать мощность 93,513 Вт даже в крайне неблагоприятных условиях при малых скоростях ветра.

Выводы. Проведенное в MATLAB Simulink моделирование подтвердило высокую энергоэффективность многофазной ветроэнергетической установки для задач АПК. Модель демонстрирует не только факт работоспособности системы для автономного питания, но и детально показывает, как она функционирует в изменяющихся условиях скорости ветра, имитирующих реальную работу на удаленных объ-

ектах АПК – фермах, пасаках, тепличных хозяйствах, насосных станциях и хранилищах продукции.

Показали, как происходит реконфигурация схемы выпрямителей и каким образом ведут себя напряжение и ток при изменении скорости ветра, а также как при этом поддерживается стабильный уровень выходного напряжения в диапазоне 305,5-309,4 В (рис. 3), даже при четырехкратном изменении скорости ветра. Такая устойчивость параметров особенно важна для электроприводов, систем вентиляции, доильного и насосного оборудования, чувствительных к отклонениям питающего напряжения.

Полученные результаты служат убедительным доказательством того, что многофазная ВЭУ с реконфигурируемой схемой выпрямления способна обеспечить надежное и качественное электроснабжение объектов АПК, снижая зависимость от централизованных сетей и традиционных видов топлива.

Библиографический список

1. Воронкова Е.А. Инновационные подходы в развитии энергоснабжения российского агропромышленного комплекса // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2009. N3(23). С. 117-120. EDN: KWBTWP.
2. Жестков Ю.Н. Ветроэнергетическая установка для хозяйств АПК // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2012. N81. С. 441-447. EDN: PETICV.
3. Хакимов И.С., Миллер М.В., Новиков В.Ф. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения для агропромышленного комплекса // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. N5(20). С. 265-269. EDN: XTKEPD.
4. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Перспективы применения многофазных машин переменного тока // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2017. N1. С. 19-26. EDN: YGKHUR.
5. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Элементы теории многофазных вентильных электро-механических систем // *Электротехника*. 2019. N10. С. 56-61. EDN: XHJARD.
6. Пастухов С.В. Вопросы оценки и повышения эффективности хозяйственной деятельности на предприятиях и в отраслях АПК с учетом энергетической эффективности и использования альтернативных источников энергии // *Вестник Российской Федерации по электрической и электронной технике*. 2022. N43(48). С. 84-89. EDN: PUQFOH.

7. Литвиненко А.М., Кудрявцев Г.В., Ибрагимов М.У. Исследование адаптивной системы управления электроэнергетическим комплексом с ветроэлектрогенератором // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2021. N3(65). С. 10-17. DOI: 10.53015/18159958_2021_3_10. EDN: ATCZUP.
8. Махиянов А.В., Саттаров Р.Р., Саттаров Б.Р. Классификация девятифазных реконфигурируемых ветроэнергетических установок // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2025. Т. 21. N3. С. 45-56. DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-46-56. EDN: AALHTW.
9. Саттаров Р.Р., Махиянов А.В., Миниаметова С.О. Компьютерное моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2024. Т. 20. N3. С. 28-37. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37. EDN: CXSRZU.
10. Саттаров Р.Р., Махиянов А.В. Моделирование ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов со стабилизацией напряжения при изменяющейся скорости ветра // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2025. Т. 21. N1. С. 16-25. DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25. EDN: ODHCOK.
11. Махиянов А.В., Саттаров Р.Р. Имитационное моделирование ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2025. Т. 21. N3. С. 36-45. DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-36-45. EDN: CEEBYM.

References

1. Voronkova Ye.A. Innovative approaches to energy supply development of the agro-industrial complex in Russia. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*. 2009. N3(23). 117-120 (In Russian). EDN: KWBTWP.
2. Zhestkov Yu.N. Windmills for the agriculture companies. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2012. N81. 441-447 (In Russian). EDN: PETICV.
3. Khakimov I.S., Miller M.V., Novikov V.F. Vertical-axis wind turbine installation for the agro-industrial complex. *Innovations in Agriculture*. 2016. N5(20). 265-269 (In Russian). EDN: XTKEPD.
4. Tereshkin V., Grishin D., Makulov I. Perspectives of multi-phase machines. *Electronics and Electrical Equipment of Transport*. 2017. N1. 19-26 (In Russian).

EDN: YGKHUR.

5. Tereshkin V.M., Grishin D.A., Makulov I.A. Elements of the theory of multiphase valve electromechanical systems. *Electrical Engineering*. 2019. N10. 56-61 (In Russian). EDN: XHJARD.
6. Pastukhov S.V. Issues of evaluation and increasing the efficiency of economic activities at enterprises of agro-industrial complex. Considering energy efficiency and the use of alternative energy sources. *Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University*. 2022. N43(48). 84-89 (In Russian). EDN: PUQFOH.
7. Litvinenko A.M., Kudryavtsev G.V., Ibragimov M.U. Research of an adaptive control system of an electric power complex with a wind power generator. *News of higher educational institutions of the Chernozem region*. 2021. N3(65). 10-17 (In Russian). DOI: 10.53015/18159958_2021_3_10. EDN: ATCZUP.
8. Makhyanov A.V., Sattarov R.R., Sattarov B.R. Classification of nine-phase reconfigurable wind power installations. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2025. Vol. 21. N3. 45-56 (In Russian). DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-46-56. EDN: AALHTW.
9. Sattarov R.R., Makhyanov A.V., Miniakhmetova S.O. Computer simulation of a wind turbine based on two synchronous generators with permanent magnets. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2024. Vol. 20. N3. 28-37 (In Russian). DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37. EDN: CXSRZU.
10. Sattarov R.R., Makhyanov A.V. Modeling a wind turbine based on two five-phase magnetoelectric generators with voltage stabilization at changing wind speed. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2025. Vol. 21. N1. 16-25 (In Russian). DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25. EDN: ODHCOK.
11. Makhyanov A.V., Sattarov R.R. Simulation modeling of a wind energy installation with a reconfigurable rectifier circuit. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2025. Vol. 21. N3. 36-45 (In Russian). DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-36-45. EDN: CEEBYM.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.04.2026

Статья принята к публикации 26.05.2026