



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

Е-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 16.09.2026 г.

Формат 60×84/8. Объем 12,0 печ. л.

Тираж 100 экз. Печать цифровая.

Отпечатано в типографии

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

ISSN 2658-4859

Содержание номера

Электрофизические воздействия на материалы и среды

Поручиков Д.В., Еришова И.Г., Соловьёв С.В.

Разработка и исследование параметров сверхвысокочастотной установки
для термообработки субпродуктов

3

Электроснабжение и электрооборудование

Коновалова Д.А., Коновалов И.А., Карамов Д.Н.

Адаптация релейной защиты сельских распределительных сетей 6-10 кВ
к интеграции фотоэлектрических станций

11

Зинев Ш.З., Гданский Н.И., Каргин В.А.

Комплексные нечеткие модели и механизмы логического вывода в локальных
экспертных системах электросетевого обслуживания

22

Литвинов М.А., Кривко С.И.

Разработка лабораторного стенда и оценка работы водородного топливного
элемента для обеспечения электроэнергией бортовой сети БВС

29

Ахметшин Р.С., Лецинская Т.Б., Попядухин Е.В.

Способ гашения дуги с синхронизацией в предохранителе и дугогасительной
камере КРУН 35 кВ

36

Тепло-энергообеспечение и энергосбережение

Хименко А.В., Тихомиров Д.А., Кузьмичев А.В.

Режимы работы комбинированной системы электрического теплоаккумуляционного
обогрева животноводческих помещений

41

Довлатов И.М., Комков И.В., Будников Д.А.

Разработка алгоритмов функционирования лабораторного образца системы
контроля параметров микроклимата

48

Автоматизация и управление технологическими процессами

Гируцкий И.И., Сеньков А.Г., Слимаков Д.Д.

Теплофизическая модель вымени коровы как объекта
термографического контроля

56

Карпов А.В., Гданский Н.И., Каргин В.А.,

Стрельников В.А. Повышение точности управления беспилотной
сельскохозяйственной техникой на основе сплайнового интерполирования
кривой нагрузки

65

Технологии и средства механизации и роботизации

Гаджиев И.П., Лимаренко Н.В., Успенский И.А., Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г.

Оценка эффективности моделирования параметров элеватора
с интенсификатором картофелеуборочного комбайна

73

Прокопьев Л.Н., Лекомцев П.Л.

Математическая модель движения роботизированной платформы
для дезинфекции животноводческих помещений

81

Возобновляемая и нетрадиционная энергетика

Панченко В.А., Чирский С.П.

Моделирование и изготовление мобильного концентратора
теплофотоэлектрического модуля с двусторонним фотоприемником

87

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. Zatsepina, 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 16.09.2026.

The format is 60×84/8.

Volume 12.0 printed sheet.

The circulation is 100 copies

Printed by FSAC VIM

ISSN 2658-4859

Contents

Electrophysical effects on materials and media

Poruchikov D.V., Ershova I.G., Solovyov S.V.

Development and study of parameters of ultra-high-frequency installation
for heat treatment of by-products 3

Power supply and electrical equipment

Konovalova D.A., Konovalov I.A., Karamov D.N.

Adaptation of relay protection of rural 6-10 kV distribution grid to the integration
of photovoltaic stations 11

Ziniev Sh.Z., Gdanskij N.I., Kargin V.A.

Complex fuzzy models and inference mechanisms in local expert systems
for electric grid maintenance 22

Litvinov M.A., Krivko S.I.

Development of a laboratory test bench and evaluation of the performance
of a hydrogen fuel cell for powering the onboard electrical system
of an unmanned aerial vehicle (UAV) 29

Akhmetshin R.S., Leshchinskaya T.B., Popryadukhin E.V.

A method of extinguishing an arc with synchronization in a fuse and an arc extinguishing
chamber of complete switchgear of 35 kV 36

Heat supply and energy saving

Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V.

Operating modes of a combined electric thermal storage heating system
in livestock premises 41

Dovlatov I.M., Komkov I.V., Budnikov D.A.

Development of algorithms for the functioning of a laboratory sample
of a microclimate parameter monitoring system 48

Automation and technological processes control

Girutskiy I.I., Senkov A.G., Slimakov D.D.

Thermophysical model of the cow's udder as an object of thermographic control 56

Karpov A.V., Gdanskij N.I., Kargin V.A., Strelnikov V.A.

Improving the control accuracy of unmanned agricultural vehicles based
on spline interpolation of the load curve 65

Technologies and means of mechanization and robotization

Gadzhiev I.P., Limarenko N.V., Uspenskiy I.A., Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G.

Evaluation of the efficiency of modeling the parameters of an elevator
with a potato harvester intensifier 73

Prokopyev L.N., Lekomtsev P.L.

Mathematical model of the movement of a robotic platform for disinfection
of livestock facilities 81

Renewable and unconventional energy

Panchenko V.A., Chirskiy S.P.

Modeling and manufacturing of a mobile concentrator photovoltaic thermal module
with a two-side photoreceiver 87

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



Разработка и исследование параметров сверхвысокочастотной установки для термообработки субпродуктов

Дмитрий Витальевич Поручиков¹,

научный сотрудник;

Ирина Георгиевна Ершова¹,

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: eig85@yandex.ru;

Сергей Владимирович Соловьёв^{2,3},

кандидат технических наук, доцент

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

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

³Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва, Российская Федерация

Реферат. В России наблюдается рост производства мяса: в 2024 году объем производства составил 12,22 миллиона тонн, что на 2-3 процента больше предыдущего года. Производство мяса птицы в сельскохозяйственных организациях достигло 5,53 миллиона тонн (в живом весе) за январь-октябрь 2023 года, с прогнозом роста до 6,7 миллиона тонн по итогам года. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения рентабельности производства мясных субпродуктов путем их реализации в переработанном виде. Работа направлена на разработку инновационной СВЧ-установки для термообработки и массирования субпродуктов в рассоле. (Цель исследования) Разработать радиогерметичную СВЧ-установку для термообработки субпродуктов в процессе массирования в рассоле, позволяющую улучшить потребительские свойства мясного продукта при сниженных энергетических затратах. (Материалы и методы) Провели анализ физических процессов при электромагнитном воздействии, разработали технологию совмещения термообработки и массирования, создали трехмерную модель резонатора-барабана. (Результаты и обсуждение) Показали основные параметры разработанной установки – производительность: 10 килограммов в час, удельная мощность: 1,6 ватт на грамм, продолжительность обработки: 60 минут (в базовом исполнении 90 минут), концентрация соли: 12,88 процента; энергетические затраты: 0,185 киловатт-час на килограмм, частота вращения: 23 оборота в минуту. Выявили, что результаты внедрения технологии дали ускорение термообработки на 33 процента и получение продукта с улучшенными потребительскими характеристиками. (Выводы) Исследовали мощности потока излучений СВЧ-установки с целевым резонатором-барабаном в экранирующем корпусе с открывающимся люком для загрузки сырья и выгрузки продукта. Определили, что длительность пребывания персонала в зонах влияния источника излучения оценивалась по энергетической экспозиции. Констатировали, что разработанную СВЧ-установку по безопасной норме СВЧ-излучения можно обслуживать на расстоянии 0,5 метра в течение рабочего дня.

Ключевые слова: субпродукты, термообработка в электромагнитном поле сверхвысокой частоты, целевой резонатор, массирование, эндогенный нагрев.

Для цитирования: Поручиков Д.В., Ершова И.Г., Соловьёв С.В. Разработка и исследование параметров сверхвысокочастотной установки для термообработки субпродуктов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 3-10. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-3-10. EDN: FXDZZW.

Scientific article

Development and Study of Parameters of Ultra-High-Frequency Installation for Heat Treatment of By-Products

Dmitriy V. Poruchikov¹,

researcher;

Irina G. Ershova¹,

Dr.Sc.(Eng.), leading researcher, e-mail: eig85@yandex.ru;

Sergey V. Solovyov^{2,3}

Ph.D.(Eng.), associate professor

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation;

³All-Russian Institute of Scientific and Technical Information RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract. *In Russia, there is an increase in meat production: in 2024, the production amounted to 12.22 million tons, which is 2-3 percent more than the previous year. Poultry meat production in agricultural organizations reached 5.53 million tons (live weight) in January-October 2023, with a forecast of growth to 6.7 million tons for the year. The relevance of the study is due to the need to increase the profitability of the production of meat by-product by selling them in a processed form. The work is aimed at developing an innovative microwave plant for heat treatment and massaging of by-products in brine. (Research purpose) The research purpose is developing a radio-isolated microwave unit for heat treatment of offal during massaging in brine, which allows to improve the consumer properties of the meat product at reduced energy costs. (Materials and methods) We analyzed physical processes under electromagnetic influence, developed a technology for combining heat treatment and massaging, created a three-dimensional model of the resonator-drum. (Results and discussion) They showed that the main parameters of the developed unit: performance: 10 kilograms per hour, specific power: 1.6 watts per gram, processing duration: 60 minutes (in the basic version 90 minutes), salt concentration: 12.88 percent; energy costs: 0.185 kilowatt-hour per kilogram, rotation frequency: 23 revolutions per minute. It was found that the results of the technology implementation gave an acceleration of heat treatment by 33 percent and the production of a by-product with improved consumer characteristics. (Conclusions) We studied the radiation flux capacity of the microwave plant with a slot resonator-drum in the shielding case, with an opening hatch for loading raw materials and unloading the product. It was determined that the duration of staff stay in the areas of influence of the radiation source was estimated by energy exposure. It was stated that the developed microwave plant at a safe rate of microwave radiation can be serviced at a distance of 0.5 meters during the working day. **Keywords:** by-products, heat treatment in an electromagnetic field of ultrahigh frequency, slot resonator, massaging, endogenous heating.*

For citation: Poruchikov D.V., Ershova I.G., Solovyov S.V. Development and study of parameters of ultra-high-frequency installation for heat treatment of by-products. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. 73. N3. 3-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-3-10. EDN: FXDZZW.

По данным Росстата, в 2024 году производство скота и птицы на убой в хозяйствах всех категорий в убойном весе составило около 12,0 млн т, что на 2,1% больше, чем в 2023 году. Производство говядины (включая субпродукты) в убойном весе достигло 1,69 млн т (в живой массе – около 3,07 млн т). При этом импорт говядины за 2024 год снизился до 232 тыс. т, а экспорт увеличился до 36,2 тыс. т. Динамика производства, импорта и экспорта говядины за период 2017-2024 год представлена на *рисунке 1*. Производство мяса птицы в убойном весе в 2024 году составило 5,4 млн т, что на 2,8% выше показателя 2023 года.

С увеличением производства продукции животноводства встает вопрос рационального использования

субпродуктов, содержащих натуральные белки (15-19%) и жиры (до 12%). В настоящее время такое сырье преимущественно реализуется без переработки. Для повышения рентабельности производства предлагается реализовать субпродукты в вареном виде. Один из способов получения вареной продукции из мясного сырья с хорошими потребительскими свойствами – это эндогенный нагрев при массажи в рассоле. Процесс массажи мясного сырья в течение 3-4 ч после инъекции рассолом при производстве вареных мясных изделий широко распространен, но для субпродуктов такая технология исключается из-за трудности инъектирования рассолом.

С учетом направления Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ



Рис. 1. Динамика производства, импорта и экспорта говядины (включая субпродукты) в России в 2017-2024 годах, тыс. т (составлено по данным Росстата и ФГБУ «Центр Агроаналитики»)

Fig. 1. Dynamics of production, import and export of beef (including offal) in Russia in 2017-2024, thousand tons (composed according to Rosstat and FGBI «Center for Agroanalytics»)

Президента РФ от 28.02.2024 № 145), обеспечивающего «...разработку ... и эффективную переработку сельскохозяйственной продукции», разработка технологии и обоснование параметров сверхвысокочастотной установки для термообработки и массирования субпродуктов актуальна.

Цель исследования – разработать радиогерметичную СВЧ-установку для термообработки субпродуктов в процессе массирования в рассоле, позволяющую улучшить потребительские свойства мясного продукта при сниженных энергетических затратах.

Материалы и методы. Теоретические исследования провели, анализируя физические процессы, связанные с распространением электромагнитных волн в средах с потерями; изучив массообменные процессы в мясном сырье с посолочным веществом при эндогенном нагреве. Обоснование режимов работы установки осуществили через регрессионные модели, полученные с применением трехфакторного эксперимента типа 2^3 в программах *Statistic 12.0*, *Excel 10.0*. В программе *Компас-3D V18* выполнили трехмерное моделирование конструктивного исполнения цилиндрического щелевого резонатора-барабана. Электромагнитную безопасность оценили по результатам исследований мощности потока излучений установки с помощью измерителя ПЗ-33М.

Результаты и обсуждение. Проанализировали диэлектрические характеристики мясного сырья в зависимости от частоты электромагнитного поля, температуры, жирности, концентрации рассола, плотности по данным И.А. Рогова – изменения диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и фактора потерь k [1-8]. Известно, что высокое значение диэлектрической проницаемости при метровом диапазоне волн

и резкое падение его в сантиметровом диапазоне связано с релаксацией процесса заряда и разряда на мембране клетки [4, 2, 7].

С уменьшением влажности мясного сырья диэлектрическая проницаемость непрерывно снижается [4]. В результате этого водяные мостики, обуславливающие сквозную проводимость, нарушаются, что приводит к уменьшению коэффициента поглощения [2, 6]. Диэлектрические характеристики мясного сырья зависят от температуры, это вызвано уменьшением времени релаксации с ростом температуры, а также изменением форм связи влаги в ткани в результате денатурации белков [2, 8].

Изменение диэлектрических характеристик мясного сырья носит сложный характер, так как при капиллярно-пористой структуре ткани формы связи влаги весьма разнообразны. Основные факторы, влияющие на диэлектрические характеристики мясного сырья при частоте 2450 МГц, – влажность, плотность, температура [1, 5]. Все эти особенности следует учесть при термомеханической обработке мясного сырья с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты [6, 8]. Плотность субпродуктов составляет 1070 кг/м^3 , теплоемкость – $2170\text{-}3600 \text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ [1, 5].

Учитывая выявленные зависимости диэлектрических свойств от температуры и солености, разработали операционно-технологическую схему, позволяющую реализовать контролируемый эндогенный нагрев птичьего сердца в зависимости от содержания поваренной соли при температуре 20°C и частоте 2450 МГц (рис. 2).

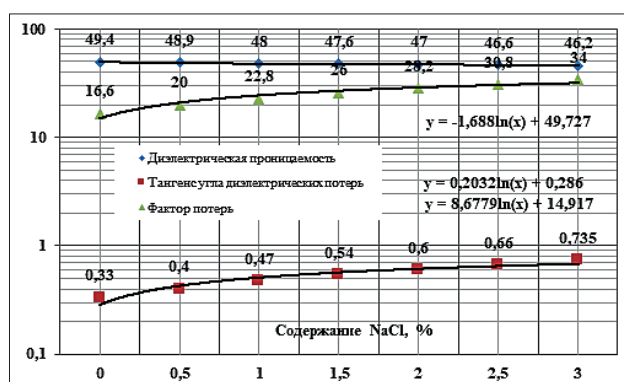


Рис. 2. Диэлектрические характеристики птичьего сердца в зависимости от содержания поваренной соли при температуре 20°C и частоте 2450 МГц

Fig. 2. Dielectric characteristics of the bird heart depending on the content of table salt at a temperature of 20°C and a frequency of 2450 MHz

Фактор диэлектрических потерь птичьего сердца в зависимости от содержания поваренной соли при

температуре 20 °С и частоте 2450 МГц:

$$k = 8,6779 \ln(c) + 14,917, \quad (1)$$

где c – содержание поваренной соли, %.

Операционно-технологическая схема термообработки мясного сырья в установке с цилиндрическим резонатором-барабаном для работы в периодическом режиме представлена на *рисунке 3* [2]. Объем рассола и концентрация соли в нем зависят от объема резонатора, вида обрабатываемого сырья, длительности и температуры хранения продукта. Регулирование технологических параметров дает возможность максимально точно подобрать режим обработки для каждого вида исходного сырья. Установка содержит элементы контроля и управления: тумблеры включения, индикаторные лампы, датчики температуры [3, 6].

Существующие мясомассажеры имеют основной недостаток – наличие вакуумной системы, которая не позволяет выдерживать глубокий вакуум в барабане, так как в процессе его вращения систему необходимо отсоединить [6].



Рис. 3. Операционно-технологическая схема термообработки мясного сырья в установке с цилиндрическим резонатором-барабаном для работы в периодическом режиме

Fig. 3. Operational and technological scheme of heat treatment of meat raw materials in an installation with a cylindrical resonator-drum for periodic operation

Для устранения этих недостатков авторы предложили СВЧ-установку с нетрадиционным резонатором, который совмещает функции мясомассажера и термообработки субпродуктов.

С целью интенсификации фильтрационно-диффузионных процессов рассола предлагается процесс массирования мясного сырья осуществлять

в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). В установке предусмотрено сочетание механического и электромагнитного воздействия на сырье без вакуума в барабане.

СВЧ-установка циклического действия для термообработки мясного сырья в процессе массирования (патент № 2650540) содержит цилиндрический экранирующий корпус 2, внутри которого соосно расположен открытый цилиндрический резонатор 3 с внутренними ребрами 4 (*рис. 4*) [3]. Резонатор съемный, с разной конфигурацией отверстий перфорации или в виде беличьей клетки. Он вращается за счет сцепления ведущей шестерни 5, установленной на валу мотора-редуктора 6, с зубчатым венцом 7. Зубчатый венец размещен на ободке вокруг боковой поверхности резонатора-барабана [3, 6].

На крышке 8 экранирующего корпуса находится генераторный блок 9 со стороны открытого торца резонаторной камеры. За счет стопора 10 и поворотной рамы 11 можно изменить угол наклона установки. На дне корпуса предусмотрен сливной патрубок 12.

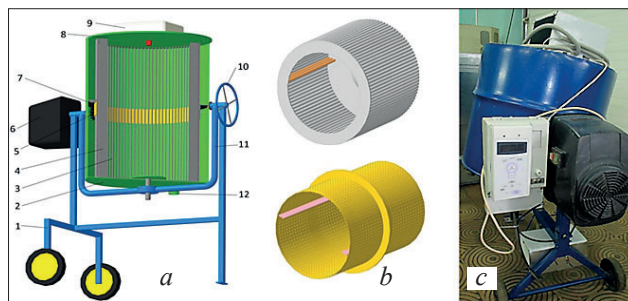


Рис. 4. СВЧ-установка для термообработки мясного сырья в процессе массирования: *a* – 3D-модель установки; *b* – варианты съемных цилиндрических резонаторов в виде беличьей клетки и перфорированный; *c* – реальное исполнение; 1 – передвижная рама; 2 – цилиндрический экранирующий корпус; 3 – цилиндрический 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. 4. microwave plant for heat treatment of meat raw materials in the process of massaging: *a* – 3D-model of the installation; *b* – variants of removable cylindrical resonators in the form of a squirrel cell and perforated; *c* – real execution; 1 – mobile frame; 2 – cylindrical shielding body; 3 – cylindrical open resonator-drum; 4 – internal ribs; 5 – leading gear; 6 – gear motor; 7 – cogwheel crown; 8 – lid of the case; 9 – generator; 10 – stopper; 11 – rotary frame for support and change the angle of inclination of the installation; 12 – drain pipe

Установка работает следующим образом: поставить рабочую камеру в вертикальное положение, открыть крышку 8 корпуса и загрузить мясное сырье с рассолом при закрытом сливном патрубке, закрыть крышку и застопорить барабан в рабочем положении – горизонтально, включить мотор-редуктор и СВЧ-генератор. Резонатор-барабан вращается со скоростью меньше критической благодаря сцеплению ведущей шестерни на валу мотора редуктора с зубчатым венцом. В камере сырье подвергается воздействию ЭМП СВЧ, эндогенно нагревается. В процессе вращения резонатора-барабана сырье за счет ребер поднимается до определенной высоты и падает, то есть происходит массирование, ускоряющее фильтрационно-диффузионный процесс [1]. Сырье поднимается вверх во вращающемся резонаторе, и под действием силы тяжести падает вниз. Процесс повторяется много раз в течение варки сырья, из-за чего продукт по составу получается однородным с малой пористостью. Частицы компонентов сырья двигаются по сложным траекториям, что приводит к активному перемешиванию, созданию вихревых потоков.

Движущей силой процесса посола служит разность концентраций соли в рассоле и в сырье, и градиент температуры. Скорость накопления соли в сырье резко снижается в течение посола вследствие уменьшения разности концентраций в системе, поэтому необходимо определить фактор, воздействие которого приводило бы к повышению концентрации соли в ткани сырья, вызывая ускорение процесса посола [7]. Рассол впитывается в ткани мясного сырья, остатки рассола стекают через щели в кольцевое пространство между резонатором и корпусом. Эффект массопереноса при массировании мясного сырья дополнительно усиливается за счет воздействия ЭМП СВЧ. Пропитанное рассолом сырье варится. При достижении определенной температуры нагрева сырья за конкретный промежуток времени следует выключить СВЧ-генератор и мотор-редуктор, а именно остановить вращение резонатора-барабана. Остатки рассола слить через сливной патрубок [2]. Для выгрузки готового продукта установка снимается со стопора и с помощью специального рычага поворачивается. Далее требуется открыть крышку корпуса, наклонить установку, открытые части корпуса и резонатора обеспечивают выгрузку готового продукта.

В установке можно проводить варку и стерилизацию продукта для продления срока хранения за счет посола сырья и эндогенного нагрева [7]. В резонатор-барабан можно загружать для термомеханического воздействия разное сырье, поэтому в каждом конкретном случае следует устанавливать соответ-

ствующий съемный резонатор [3]. При преобладании в сырье жидкой фракции рекомендуется размещать перфорированный резонатор с отверстиями малого диаметра, а в случае термомеханической обработки кускового мясного сырья использовать резонатор в виде беличьей клетки [3]. Продолжительность обработки – 60 мин (в базовом исполнении 90 мин).

Преимущества данной установки: снижение габаритных размеров, возможность контроля и изменения режимных параметров, обеспечение стабильности параметров в процессе эксплуатации и воздействии внешних факторов, расширение выпуска новых видов продукции и так далее [3]. Аналогичные разработки для других видов сырья рассматриваются в некоторых работах, где предложены многопозиционные резонаторные системы для непрерывной обработки [9, 10].

Исследование мощности потока излучений в СВЧ-установке для термообработки субпродуктов в процессе массирования.

Помимо технологической эффективности, обязательным этапом исследований стала оценка электромагнитной безопасности разработанной установки. Проектируемая СВЧ-установка для термообработки в процессе массирования субпродуктов содержит источник (магнетрон) мощностью 800 Вт, работающий в периодическом режиме. Небольшая часть этой мощности, проникая в окружающее СВЧ-установку пространство, может представлять опасность для обслуживающего персонала, поэтому при работе с установкой необходимо соблюдать требования технической безопасности. Санитарная норма в России для промышленных установок составляет 10 мВт/см^2 (СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»).

Изучили плотность потока энергии (ППЭ) электромагнитного излучения, $\text{Вт} \cdot \text{ч/м}^2$, и экспозицию в соответствии с ГОСТ 12.1.006-84, СанПиН 2.2.4 1191-03. Измерения провели с помощью ПЗ-33М, ПЗ-41. Плотность потока излучения от СВЧ-установки убывает обратно пропорционально квадрату расстояния R до установки:

$$I = W/(4\pi R^2 \cdot \tau), \text{ Вт/м}^2; \tau = W/(4\pi R^2 \cdot I), \text{ ч}, \quad (2)$$

где W – электромагнитная энергия, $\text{Вт} \cdot \text{ч}$.

Нормированное значение допустимой энергетической нагрузки на человека, мкВт/см^2 ($10 \text{ мкВт/см}^2 = 1000 \text{ Вт/м}^2$) [24]; τ – время пребывания в зоне установки, ч.

Результаты исследования продолжительности пребывания персонала около установки приведены в таблице.

Table						Таблица	
Результаты исследования продолжительности пребывания персонала около установки							
Results of the study of the duration of staff stay near the installation							
Мощность потока излучений, мкВт/см²		Допустимое время пребывания, ч					
100		2,4					
80		3					
60		4					
40		6					
20		12					
Расстояние от установки, м	Мощность потока излучений, мкВт/см²						
	на высоте, м						
	1,7		1,0		0,5		
	Плотность потока, мкВт/см²	Допустимое время пребывания, ч	Плотность потока, мкВт/см²	Допустимое время пребывания, ч	Плотность потока, мкВт/см²	Допустимое время пребывания, ч	
	0,5	79	3,03	94	2,55	100	2,4
1,0	23	10,43	45	5,33	60	4	
1,7	15	16	18	13,33	30	8	

В результате проведенных испытаний определили, что безопасный уровень плотности потока энергии на рабочем месте оператора для термообработки и массирования мясного сырья начинается с 0,5 м, что соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям [8]. Разработанную установку по безопасной норме СВЧ-излучения можно обслуживать на расстоянии 0,5 м в течение рабочего дня. Степень воздействия ЭМП на организм человека зависит от диапазона частот излучения, интенсивности воздействия, продолжительности, характера и режима облучения, размера облучаемой поверхности и особенностей организма. Длительность пребывания персонала в зоне влияния источников излучения оценивается энергетической экспозицией:

$$ЭЭ_{ППЭ} = ППЭ \cdot T,$$
 (3)

где ЭЭ_{ППЭ} – энергетическая экспозиция плотности потока энергии, (мкВт/см²)·ч; ППЭ – плотность потока энергии, мкВт/см²; T – продолжительность воздействия за смену, ч.

Графики изменения мощности потока СВЧ-излучений и возможная продолжительность работы в зависимости от расстояния до установки и высоты замера показаны на [рисунке 5](#).

Технические меры защиты от действия электромагнитных излучений сводятся к применению ферромагнитного экранирующего корпуса (из алюминия толщиной не менее 2 мм) и дистанционного управления технологическим процессом.

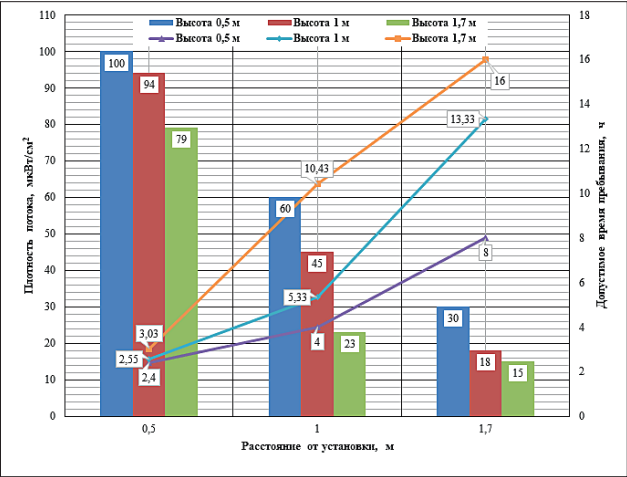


Рис. 5. Диаграмма изменения мощности потока излучений и графики продолжительности работы (в зависимости от расстояния до установки и высоты замера)
Fig. 5. Diagram of the change in the power of the radiation flux and the schedule of the duration of operation (depending on the distance to the installation and the measurement height)

Установка размещается в помещении, где обеспечивается соблюдение предельно допустимого уровня. Продолжительность нахождения персонала в зоне СВЧ-установки ограничивается в зависимости от мощности потока излучений ЭМП [8].

Выводы. Предложили новую научную идею совмещения термообработки и массирования субпродуктов в рассоле для ускорения процесса и снижения энергетических затрат, реализованную в экраниру-

ющем цилиндре с щелевым резонатором-барабаном, не требующем наличия контакта между боковой стенкой и основаниями, где в кольцевом объеме возбуждается ЭМП СВЧ от потока дифракционных излучений через щелевой резонатор, и рассол нагревается эндогенно.

Разработали и изготовили СВЧ-установку с щелевым резонатором-барабаном, обосновали режимы термообработки и массирования сырья с учетом регрессионных моделей и результатов исследований органолептических, физико-химических и микробиологических показателей мясного продукта. Выявили, что эффективные режимы следующие: производительность 10 кг/ч; удельная мощность 1,6 Вт/г; продолжительность обработки 1,0 ч при концентрации соли 12,88%; удельные энергетические затраты 0,185 кВт·ч/кг; частота вращения резонатора-барабана 23 об/мин. Предложенная технология сочетания двух процессов позволяет ускорить термообработку субпродуктов в ходе массирования впитыванием посолочных веществ на 33%, и получить продукт с улучшенными потребительскими показателями, о чем свидетельствуют положительные результаты органолептических, физико-химических и микробиологических исследований готового мясного продукта.

Провели исследования мощности потока излучений от СВЧ-установки с щелевым резонатором-барабаном в экранирующем корпусе, с открывающимся люком для загрузки сырья и выгрузки продукта. Длительность пребывания персонала в зонах влияния источника излучения оценивалась по энергетической экспозиции. Разработанную СВЧ-установку по безопасной норме СВЧ-излучения можно обслуживать на расстоянии 0,5 м в течение рабочего дня. Удельные энергетические затраты снижаются с 0,26 до 0,185 кВт·ч/кг. Полученные результаты согласуются с современными тенденциями в области энергоэффективной переработки животноводческого сырья [9, 10].

Библиографический список

1. Поручиков Д.В., Просвирякова М.В., Ларионов Г.А. и др. Технология совмещения процессов посола и термообработки субпродуктов в сверхвысококачественной установке // *Аграрная наука*. 2022. N11. С. 103-109. DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-103-109. EDN: HGSBMH.
2. 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.

3. 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.
4. Васильев А.А., Васильев А.Н., Тихомиров Д.А. Влияние влажности обрабатываемого зерна на распределение поля СВЧ от полукруглых щелевых волноводов // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2024. N1(69). С. 91-97. DOI: 10.31563/1684-7628-2024-69-1-91-97. EDN: HIWNXZ.
5. Ershova I.G., Belova M.V., Poruchikov D.V. et al. Heat treatment of fat-containing raw materials with energy of electromagnetic radiation. *International Research Journal*. 2016. Vol. 9-2. Iss. 51. 38-40. DOI: 10.18454/IRJ.2016.51.177. EDN: WLVCCB.
6. Ганенко С.В., Мухамедов Т.А., Шафиков Р.И. Совершенствование конструктивных параметров и режимов работы шнекового мясомассажера // *АПК России*. 2019. Т. 26. N3. С. 393-397. EDN: RDYRZA.
7. Дресвянникова Е.В., Лекомцев П.Л., Савушкин А.В. Возможности регулирования процессов тепло-влажностной обработки в массообменных аппаратах при воздействии электрического поля // *Инженерный вестник Дона*. 2014. N1(28). С. 33. EDN: SJDUGX.
8. Поручиков Д.В. Разработка и обоснование параметров СВЧ-установки для термообработки субпродуктов // *Вестник Чувашского государственного аграрного университета*. 2022. N3(22). С. 109-113. DOI: 10.48612/vch/3fpu-4g5t-4t1d. EDN: PXIHRT.
9. 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.
10. 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: FZANHG.

References

1. Poruchikov D.V., Prosviryakova M.V., Larionov G.A. et al. Technology for combining the processes of salting and heat treatment of offal in a microwave installation. *Agrarian Science*. 2022. N11. 103-109 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-103-109. EDN: HGSBMH.

2. Ershova I.G., Poruchikov D.V. Improving the efficiency of the functioning of the meat massager with sources of ultra-high-frequency energy in the heat treatment of raw materials. *Innovations in Agriculture*. 2019. N1(30). 34-45 (In Russian). EDN: ZAWQAX.
3. Zhdankin G.V., Novikova G.V., Poruchikov D.V. Improvement of the unit for massaging and heat treatment of meat raw materials. *Innovations in Agriculture*. 2017. N3(24). 58-62 (In Russian). EDN: LSLWOL.
4. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Tikhomirov D.A. Influence of grain moisture on the distribution of microwave field from semicircular slotted waveguides. *Bulletin of Bashkir State Agrarian University*. 2024. N1(69). 91-97 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2024-69-1-91-97. EDN: HIWNXZ.
5. Ershova I.G., Belova M.V., Poruchikov D.V. et al. Heat treatment of fat-containing raw materials with energy of electromagnetic radiation. *International Research Journal*. 2016. Vol. 9-2. Iss. 51. 38-40. DOI: 10.18454/IRJ.2016.51.177. EDN: WLCCB.
6. Ganenko S.V., Mukhamedov T.A., Shafikov R.I. Improvement of design parameters and operating modes of the screw meat massager. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2019. Vol. 26. N3. 393-397 (In Russian). EDN: RDYRZA.
7. Dresviannikova E.V., Lekomtsev P.L., Savushkin A.V. Possibilities of regulation of processes of heat-moist processing in mass-exchanged devices at influence of electric field. *Engineering journal of Don*. 2014. N1(28). 33 (In Russian). EDN: SJDUGX.
8. Poruchikov D.V. Development and substantiation of the parameters of the microwave installation for heat treatment of by-products. *Bulletin of the Chuvash State Agrarian University*. 2022. N3(22). 109-113 (In Russian). DOI: 10.48612/vch/3fpu-4g5t-4t1d. EDN: PXIHRT.
9. Poruchikov D.V. Development of a laboratory microwave installation for heat treatment of by-products. *Electrical Engineering and Equipment in Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N2. 9-17 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-2-9-17. EDN: CRBEYL.
10. Poruchikov D.V., Prosviryakova M.V., Tikhonov A.A. et al. Microwave unit for continuous heat treatment of poultry muscle stomachs. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024. Vol. 91. N6. 834-842 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-629341. EDN: FZAHHG.

Заявленный вклад соавторов:

Поручиков Д.В. – разработка концепции, проведение экспериментальных исследований, анализ результатов, подготовка текста;

Ершова И.Г. – руководство исследованиями, теоретическое обоснование, моделирование, обработка данных;

Соловьёв С.В. – анализ электрофизических параметров, оценка безопасности, редактирование рукописи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Poruchikov D.V. – concept development, experimental studies, results analysis, text preparation;

Ershova I.G. – research supervision, theoretical justification, modelling, data processing;

Solovyov S.V. – analysis of electrophysical parameters, safety assessment, manuscript editing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 30.06.2026

Статья принята к публикации 15.09.2026

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



Адаптация релейной защиты сельских распределительных сетей 6-10 кВ к интеграции фотоэлектрических станций

Дарья Андреевна Коновалова,
аспирант, e-mail: darya.shagdyr@mail.ru;

Иван Алексеевич Коновалов,
аспирант;

Дмитрий Николаевич Карамов,
кандидат технических наук, доцент

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Реферат. В связи с реализацией программ электрификации удаленных и сельских территорий в распределительные сети напряжением 6-10 кВ, изначально выполненные по радиальному принципу с однонаправленным питанием, интегрируются фотоэлектрические станции. Появление обратных потоков активной мощности, порождаемых солнечной генерацией, вступает в противоречие с алгоритмами традиционных устройств релейной защиты и автоматики, создавая угрозу надежности электроснабжения сельских потребителей. Объект исследования – сельские распределительные сети 6-10 кВ, содержащие фотоэлектрические станции; комплекс релейной защиты и автоматики, обеспечивающий их устойчивое функционирование. (Цель исследования) Проанализировать специфические вызовы, возникающие при интеграции фотоэлектрических станций в распределительные сети 6-10 кВ сельских территорий; предложить научно обоснованные подходы к адаптации релейной защиты и автоматики, учитывая особенности данного типа сетей. (Материалы и методы) Указали, что методика исследования основана на анализе физических процессов в электрических сетях, систематизации дестабилизирующих сценариев и обобщении отечественного и зарубежного опыта эксплуатации распределительных сетей 6-10 и 35 кВ с распределенной генерацией, в том числе в сельской местности. (Результаты и обсуждение) Установили пять типовых сценариев нарушения функционирования защит: потеря селективности ненаправленными токовыми защитами; неразличение рабочего и аварийного обратного тока направленными защитами; ошибочное регулирование напряжения устройствами регулирования под нагрузкой; частотный разгон в непреднамеренных островных режимах; деградация параметров настройки защит от однофазных замыканий на землю. Предложили для каждого сценария технические меры, включающие переход к направленным защитами, внедрение реле скорости изменения частоты, коррекцию уставок с привлечением данных реальных измерений и адаптацию логики автоматических регуляторов напряжения. (Выводы) Показали, что полученные результаты ориентированы на применение электросетевыми организациями и проектными институтами при модернизации релейной защиты сельских распределительных сетей в условиях масштабного присоединения фотоэлектрических станций. Констатировали, что необходимы обновление нормативно-технической документации и повышение квалификации эксплуатационного персонала.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, сельская распределительная сеть 6-10 кВ, обратная мощность, релейная защита, максимальная токовая защита, направленная защита, РПН, дугогасящий реактор, однофазное замыкание на землю, частотный разгон, электрификация сельских территорий.

Для цитирования: Коновалова Д.А., Коновалов И.А., Карамов Д.Н. Адаптация релейной защиты сельских распределительных сетей 6-10 кВ к интеграции фотоэлектрических станций // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 11-21. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-11-21. EDN: BDFYVR.

Adaptation of Relay Protection of Rural 6-10 kV Distribution Grid to the Integration of Photovoltaic Stations

Darya A. Konovalova,
postgraduate, e-mail: darya.shagdyr@mail.ru;

Ivan A. Konovalov,
postgraduate;

Dmitriy N. Karamov,
Ph.D.(Eng.), associate professor

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. *In connection with the implementation of electrification programs for remote and rural areas, photovoltaic stations are integrated into distribution grids with a voltage of 6-10 kilovolts, originally made on a radial principle with a unidirectional power supply. The emergence of reverse overflows of active power generated by solar generation contradicts the algorithms of traditional relay protection devices and automation, creating a threat to the reliability of electricity supply to rural consumers. The object of the research is rural distribution grids of 6-10 kilovolts containing photovoltaic stations; a complex of relay protection and automation that ensures their stable functioning. (Research purpose) The research purpose is analyzing specific challenges arising from the integration of FPPs into distribution grids of 6-10 kilovolts rural areas; proposing scientifically based approaches to the adaptation of relay protection and automation, taking into account the features of this type of grids. (Materials and methods) The research methodology is based on the analysis of physical processes in electrical grids, systematization of destabilizing scenarios and generalization of domestic and foreign experience in the operation of 6-10 and 35 kilovolt distribution grids with distributed generation, including in rural areas. (Results and discussion) Five typical scenarios of violation of the functioning of protections were established: loss of selectivity by undirected current protections; non-distinguishment of working and emergency reverse current by directed protections; erroneous regulation of voltage by control devices under load; frequency acceleration in unintentional island regimes; degradation of the parameters of protection settings against single-phase circuits on the ground. For each scenario, technical measures were proposed, including the transition to directed protection, the introduction of a frequency change rate relay, the correction of settings with the involvement of real measurement data and the adaptation of the logic of automatic voltage regulators. (Conclusions) They showed that the obtained results are focused on the use of electric grid organizations and design institutes in the modernization of relay protection of rural distribution grids in the conditions of large-scale connection of photovoltaic stations. It was noted that it is necessary to update the regulatory and technical documentation and improve the skills of operational personnel.*

Keywords: *photovoltaic power plant, rural distribution grids of 6-10 kV, reverse power, relay protection, maximum current protection, directional protection, RPN, arc extinguishing reactor, single-phase earth fault, frequency acceleration, electrification of rural areas.*

For citation: Konovalova D.A., Konovalov I.A., Karamov D.N. Adaptation of relay protection of rural 6-10 kV distribution grid to the integration of photovoltaic stations. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 11-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-11-21. EDN: BDFYVR.

Электрификация сельских территорий в Российской Федерации неразрывно связана с государственной политикой развития единой электроэнергетической системы страны в условиях внедрения механизмов поддержки возобновляемых источников энергии. Фотоэлектрические станции (ФЭС) малой и средней мощности,

размещаемые в распределительных сетях 6-10 кВ, изменяют традиционный пассивный характер сельских электрических сетей, превращая их в активно-адаптивные системы с двусторонним питанием. Данное обстоятельство создает комплекс проблем, связанных с нарушением селективности, снижением чувствительности и ложной работой устройств

релейной защиты (РЗ), изначально спроектированных для радиальных сетей с односторонним питанием [1].

Современные нормативные требования, указанные в ГОСТ Р МЭК 61727-2016 и ГОСТ Р 58651.1-2019, а также в рекомендациях *IEC TS 62257-5* для сельской электрификации, фиксируют необходимость пересмотра подходов к построению защит, однако вопросы их адаптации к конкретным схемно-режимным условиям сельских сетей остаются открытыми.

К настоящему времени существует значительный объем исследований влияния распределенной генерации на функционирование РЗ. Показано, что источники, имеющие инверторное звено, радикально изменяют параметры токов короткого замыкания (КЗ), а именно ограничивают их амплитуду, формируют несинусоидальный характер и быстро изменяющийся фазовый сдвиг [2]. Анализируются проблемы согласования максимальных токовых защит в сетях с фотоэлектрическими системами, зафиксировано явление «моргания» уставок при стохастической облачности и суточных колебаниях генерации [3]. Обобщен отечественный опыт унификации принципов РЗ ФЭС с акцентом на стандартизацию функциональных модулей, предложены средства автоматизированного расчета параметров срабатывания для распределительных сетей 6-35 кВ [4, 5]. Адаптивные методы, использующие цифровые двойники и коммуникационную связь, интенсивно разрабатываются за рубежом, но их прямое перенесение на сельские сети России сдерживается высокой стоимостью телемеханизации и слабой наблюдаемостью [6, 7].

Специфика сельских распределительных сетей – большая протяженность воздушных линий, преобладание однофазных замыканий на землю, использование упрощенных схем РЗ и низкий уровень токов КЗ, требует отдельного учета в контексте массового присоединения ФЭС. Дополнительную неопределенность вносит влияние современных механизмов экономической поддержки (договоры на розничном рынке, стимулирующие тарифы), которые увеличивают количество малых фотоэлектрических установок, размещаемых непосредственно у сельскохозяйственных потребителей [8]. Такая рассредоточенная генерация формирует ранее не характерные для сельских сетей контуры подпитки места КЗ, что делает неэффективными традиционные направленные и ненаправленные токовые отсечки. Несмотря на наличие отдельных технических решений, таких как применение дистанционных защит или избирательных токовых алгоритмов, не-

достаточно глубоко проработан комплексный подход, учитывающий одновременно характерные для сельской местности режимы заземления нейтрали, ограниченную номенклатуру устанавливаемых терминалов и необходимость параметрической адаптации к изменяющимся уровням генерации без полной реконструкции сети.

Цель исследования – проанализировать специфические вызовы, возникающие при интеграции ФЭС в распределительные сети 6-10 кВ сельских территорий; предложить научно обоснованные подходы к адаптации релейной защиты и автоматики (РЗА), учитывающие особенности данного типа сетей. Рассмотрели как общие проблемы, так и те, которые приобретают особую значимость в контексте электрификации сельских территорий.

Материалы и методы. Нарастание доли ФЭС в структуре распределенной генерации сельских распределительных сетей 6-10 кВ продиктовано не только экологическими и регуляторными нормами, но и ощутимыми технико-экономическими эффектами, критически значимыми для электросетевых организаций, эксплуатирующих протяженные и характеризующиеся высоким износом сельские линии электропередачи.

Первый эффект заключается в пролонгации ресурса силового оборудования без его незамедлительной замены для наращивания трансформаторной мощности и пропускной способности фидеров. Для сельских распределительных сетей 6-10 кВ свойствен устойчивый тренд роста электропотребления: по данным АО «СО ЕЭС», в целом по единой энергосистеме России в 2024 году прирост составил порядка 3,8% относительно предшествующего периода. Вследствие этого загрузка трансформаторов на центрах питания (ЦП) в часы максимума нагрузки нередко достигает 80-90% от номинала, провоцируя ускоренную деградацию изоляции, срабатывание защит от перегрузки и снижение надежности электроснабжения конечных потребителей. Традиционный метод решения этой проблемы предполагает замену силового трансформатора на установку большей мощности, что сопряжено со значительными капитальными затратами на проектирование, приобретение оборудования, в том числе на смежных участках и строительно-монтажные работы, включая реконструкцию закрытых и комплектных трансформаторных подстанций.

Интеграция ФЭС на стороне 6-10 кВ в зоне питания ЦП позволяет смягчить остроту проблемы: фотоэлектрические системы генерируют активную мощность в дневные часы, которые, как показывают исследования профилей нагрузки сельскохозяй-

зайтвенных потребителей, во многом совпадают с интервалами максимального электропотребления (работа технологического оборудования фермерских хозяйств, систем вентиляции и водоснабжения). Как следствие, поток мощности, транслируемый от ЦП по отходящим линиям к потребителям, сокращается на величину генерации ФЭС, расположенных за этими линиями. Экспериментальные исследования на физических моделях сельских электрических сетей 0,4-10 кВ зафиксировали уменьшение суммарных потерь активной мощности в 1,7-3,2 раза в зависимости от места подключения фотоэлектрической системы относительно трансформатора 10/0,4 кВ, при этом коэффициент загрузки силового трансформатора снижался на 3-9%.

Второй технико-экономический эффект обусловлен возможностью покрытия локального дефицита мощности, характерного, по данным АО «СО ЕЭС», для ряда энергоузлов Дальнего Востока и Юга России, где текущий дефицит оценивается в несколько тысяч мегаватт, а для его полной ликвидации требуется сооружение генерирующих мощностей на десятки гигаватт [9]. Строительство крупных традиционных электростанций предполагает значительные временные и финансовые ресурсы, в то время как распределенное размещение в сельских сетях 6-10 кВ фотоэлектрических установок малой и средней мощности дает возможность достичь ощутимого совокупного эффекта без масштабной реконструкции инфраструктуры, компенсируя дефицит за счет приближения генерации к центрам потребления.

Однако включение ФЭС в сельские распределительные сети 6-10 кВ неизбежно влечет за собой комплекс технических задач, требующих системного анализа: воздействие на показатели качества электроэнергии, оценку надежности, определение оптимальной точки подключения ФЭС, а также обеспечение корректной работы релейной защиты в условиях изменения топологии сети и появления дополнительных источников энергии. Настоящее исследование сфокусировано на последней проблеме, а именно анализе поведения релейной защиты при трансформации конфигурации сельской распределительной сети, обусловленной интеграцией фотоэлектрической генерации.

Релейная защита распределительных сетей 6-10 кВ

Сельские распределительные сети напряжением 6-10 кВ образуют завершающее звено транспортного коридора электроэнергии, связывая питающие подстанции 35-110 кВ с рассредоточенными сельскохозяйственными и коммунально-бытовыми потреби-

лями. На этом иерархическом уровне регистрируется наибольшая частота аварийных событий, а каждый перерыв в электроснабжении непосредственно отражается на технологических процессах и качестве жизни населения [10]. Вследствие значительной протяженности воздушных линий, малых сечений проводов и преобладания однофазных замыканий на землю сельские сети предъявляют повышенные требования к быстродействию, чувствительности и селективности релейной защиты.

Функциональное назначение РЗ в сетях 6-10 кВ состоит в избирательном отделении поврежденного элемента от неповрежденной части системы. При возникновении КЗ или замыкания на землю защита обязана с минимально возможной выдержкой времени сформировать команду на отключение, чтобы исключить развитие термических и электродинамических перегрузок оборудования, ограничить просадки напряжения и сохранить устойчивость параллельной работы соседних присоединений. Принципиально важно, чтобы сработал только тот коммутационный аппарат, который питает аварийный участок (основные защиты на вводе центра питания), а секционный выключатель должен оставаться в работе, не реагируя на повреждения в зоне действия отходящих фидеров. Таким образом, защита должна однозначно отличать внутренние повреждения от внешних.

Сельские распределительные сети 6-10 кВ изначально проектировались и эксплуатируются как радиальные схемы с односторонним питанием: шины центра питания – линия – нагрузка. Ток КЗ в такой конфигурации всегда течет от источника к потребителю, что позволило сформировать простые и надежные алгоритмы РЗ, основанные исключительно на контроле модуля тока и его динамики. По этой причине подавляющая часть эксплуатируемых в сельских сетях защит реализована в виде максимальных токовых защит и токовых отсеков, не оснащенных органами направления мощности. Подобная однонаправленная модель функционирования релейной защиты была заложена в типовые проектные решения и подтверждена многолетней эксплуатационной практикой.

Вместе с тем любое появление дополнительного источника генерации, в том числе ФЭС, подключаемых на стороне 6-10 кВ в глубине фидера, кардинально ломает сложившийся стереотип. Возникает второй источник тока КЗ, направление мощности в линии может меняться, а привычные уставки токовых защит теряют прежнюю способность различать зоны действия, что ведет к неселективным отключениям

и ложной работе РЗ в сельских электрических сетях.

На *рисунке 1* представлена типовая схема расположения защит фидеров 6-10 кВ. Основными защитами служат максимальная токовая защита (МТЗ), токовая отсечка (ТО), защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

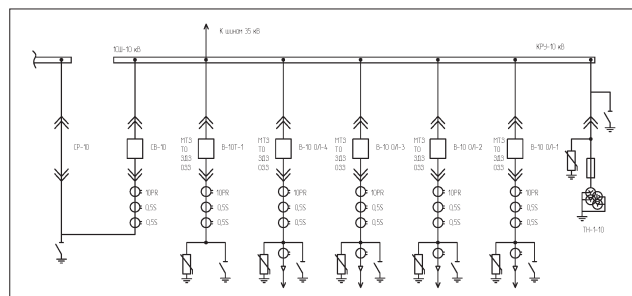


Рис. 1. Типовая схема расположения защит фидеров 6-10 кВ

Fig. 1. Typical layout of 6-10 kV feeder protections

Опасности, создаваемые интеграцией фотоэлектрических станций в сети 6-10 кВ для функционирования релейной защиты

Интеграция инверторных фотоэлектрических установок в сельские распределительные сети напряжением 6-10 кВ кардинально меняет их традиционную радиальную архитектуру. Появление двустороннего питания вызывает деградацию базового критерия работоспособности РЗ – нарушение селективности, что обусловлено многовариантностью образования реверсивных перетоков.

Реверс мощности на участках сельских сетей 10 кВ характеризует эксплуатационный режим с инверсией классической схемы потокораспределения. С физической точки зрения данный процесс возникает, когда суммарная генерация ФЭС превышает объемы потребления локальной нагрузки в рамках конкретного фидера. Как следствие, невостребованный избыток электроэнергии направляется к вышестоящему питающему узлу (подстанции), выстраивая вектор мощности противоположно нормальному (однаправленному) режиму.

Для терминалов РЗ и смежной сетевой автоматики сельских линий подобный феномен формирует комплекс скрытых и специфических угроз функциональности. Далее подробно проанализировали основные сценарии некорректного срабатывания устройств РЗА на фоне возникновения обратного потока мощности.

Сценарий А1. Нарушение селективности при внешних коротких замыканиях. Ненаправленные защиты

На *рисунке 2* приведен сценарий, при котором КЗ происходит на соседнем фидере, не содержащем

ФЭС. Ток подпитки от шин ЦП устремляется к месту повреждения. Однако, если в пределах рассматриваемого узла имеется фидер с присоединенной ФЭС, то будучи включенной параллельно с шиной, станция также начинает генерировать ток в точку КЗ. Направление этого тока – от линии (со стороны ФЭС) к шинам ЦП и далее на поврежденный фидер.

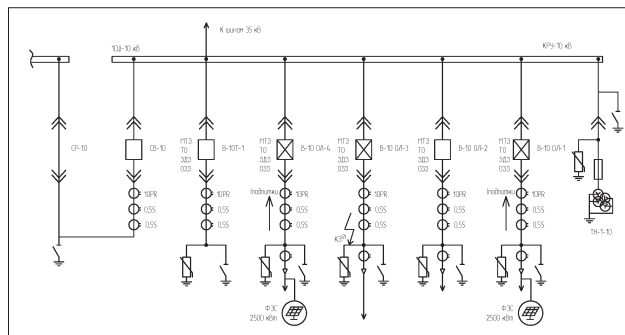


Рис. 2. Схема работы ненаправленной РЗ при КЗ на фидере 6-10 кВ с подключенной к нему ФЭС

Fig. 2. Scheme of operation of non-directional relay protection in case of a short circuit on a 6-10 kV feeder with a power supply system connected to it

Для ненаправленной максимальной токовой защиты, установленной на фидере с ФЭС, данный обратный ток по своей амплитуде может оказаться сопоставимым с током КЗ в зоне ее непосредственной ответственности. Поскольку защита лишена органа, фиксирующего направление потока мощности, она интерпретирует этот ток как внутреннее повреждение и инициирует отключение заведомо исправной линии. Эта последовательность приводит к неселективному отключению, потере питания потребителей на здоровом фидере и необоснованному воздействию на оборудование.

Особенно это опасно для одновременного подключения нескольких ФЭС к одной секции шин на разных фидерах, поскольку в таком случае есть вероятность ошибочного отключения вводного выключателя.

Сценарий А2. Нарушение селективности при внешних коротких замыканиях. Направленные защиты

Рассмотрение проблематики обеспечения селективности терминалов релейной защиты в распределительных сельских электрических сетях требует особого внимания к внедрению измерительных органов с контролем направления мощности в качестве превентивной меры от несанкционированных отключений отходящих линий.

Теоретически в эксплуатационном режиме выдачи электроэнергии от ФЭС измерительный комплекс фиксирует отрицательный вектор обратной мощно-

сти, что обуславливает корректное, заблокированное состояние программного алгоритма. Однако существенное схемно-режимное противоречие возникает при коротком замыкании на смежной линии, получающей подпитку от инверторных установок посредством шин центра питания. В подобных условиях вектор аварийного тока на основном, генерирующем фидере, ориентирован строго аналогично рабочему перетоку – от линии к сборным шинам подстанции.

Следовательно, аппаратура РЗ сельских сетей оказывается в условиях параметрической неопределенности, где функциональный и аварийный режимы характеризуются идентичным знаком направления энергетического потока. Выбор токовой уставки срабатывания, превышающей номинальные значения обратного инверторного перетока, способен предотвратить ложную работу реле, но одновременно чреват отказом в функционировании защиты при КЗ, ток которых лишь незначительно превышает рабочий ток генерации. Напротив, занижение токового порога относительно нормального режима неизбежно спровоцирует перманентные ложные срабатывания выключателя фидера.

Устранение этого противоречия в сельских распределительных сетях 6-10 кВ требует высокоточной настройки угловых зон срабатывания реле направления мощности с обязательным встраиванием в микропроцессорную логику дополнительных подтверждающих условий, прежде всего, алгоритмического аппарата выделения и непрерывного мониторинга составляющих тока нулевой последовательности.

Сценарий Б. Некорректная работа автоматики регулирования напряжения

Поддержание уровня напряжения на шинах распределительных сетей 6-10 кВ в регламентированных границах, как правило, не ниже $1,05U_{ном}$ в часы максимума нагрузки и не выше $1,0U_{ном}$ в периоды минимума – обеспечивается автоматическими регуляторами напряжения (АРН), управляющими устройствами регулирования под нагрузкой (РПН) силовых трансформаторов центров питания. Классическая алгоритмическая логика АРН проектировалась в предположении однонаправленности потока мощности и базируется на непрерывном измерении модулей тока и напряжения. По величине отклонений ΔU и ΔI от уставок блок управления инициирует отсчет выдержки времени, после завершения которой выдается команда на электромеханический привод РПН. Переключающее устройство изменяет коэффициент трансформации путем коммутации витков обмотки высшего напряжения, возвращая контролируемое напряжение к заданному значению.

При выборе направления переключения принципиальную роль играет не только абсолютная величина напряжения, но и знак тока нагрузки, который традиционный АРН использует как косвенный индикатор режима сети: рост прямого тока отождествляется с увеличением нагрузки, требующим повышения напряжения (добавление витков), а его снижение – со спадом потребления. Подключение ФЭС к шинам 6-10 кВ порождает обратный переток активной мощности: трансформаторы тока на вводе фиксируют изменение направления вектора тока на противоположное – от шин в сторону трансформатора. Эта инверсия воспринимается регулятором как ложный симптом. Если реальная нагрузка в сети возросла, но частично покрывается местной генерацией ФЭС, АРН регистрирует уменьшение прямого тока и интерпретирует его как спад потребления. В результате регулятор ошибочно выдает команду на уменьшение коэффициента трансформации, выводя витки и усугубляя тем самым уже существующий провал напряжения, спровоцированный высоким уровнем нагрузки. На рисунке 3 показана наглядная схема работы РПН в случае появления обратного тока.

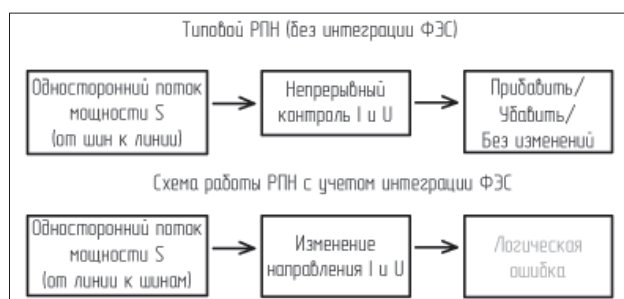


Рис. 3. Схема работы РПН в случае появления обратного тока

Fig. 3. Diagram of the voltage regulation in case of reverse current

Значительное снижение напряжения на шинах способно инициировать срабатывание встроенных защит инверторов ФЭС по минимальному напряжению, что вызывает лавинообразное отключение генерирующих модулей и резкое нарастание дефицита мощности в сети. Помимо этого, ложные циклы переключений многократно интенсифицируют износ механической части РПН и эрозию контактов коммутационного устройства.

Устранение описанного конфликта требует перехода к векторно-ориентированному управлению. АРН должен оперировать не скалярной величиной тока, а его комплексным представлением, разделяя на активную и реактивную составляющие. При этом направление регулирования следует определять не

фактом наличия тока, а величиной и знаком реактивной мощности, потребляемой сетью: если обратный поток активной мощности велик, но напряжение на шинах остается ниже уставки вследствие дефицита реактивной мощности, логика регулятора обязана формировать воздействие на повышение напряжения.

Дополнительным эффективным решением выступает интеграция в микропроцессорные терминалы управления РПН логических блокировок по знаку активной мощности. На этапе параметрирования закладывается условие, запрещающее регулирование «вниз» при обнаружении устойчивого обратного направления активного потока. Такая блокировка предотвращает формирование ошибочных команд, сохраняя механический ресурс РПН и предотвращая углубление провалов напряжения в сельских распределительных сетях с распределенной фотоэлектрической генерацией.

Сценарий В. Частотный разгон: «слепая зона» классической автоматики

Нормальный эксплуатационный режим сельской распределительной сети 6-10 кВ характеризуется стабилизацией частоты на уровне 50 Гц, согласованной с внешней энергосистемой. При аварийном или оперативном отделении участка сети с ФЭС от центра питания, например, действием защиты вышестоящей линии, формируется изолированная электромеханическая система – непреднамеренный островной режим (*unintentional islanding*), в котором частота полностью определяется локальным балансом активной мощности [11]. Если в момент изоляции суммарная генерация ФЭС превышает текущее потребление, избыток активной мощности преобразуется в кинетическую энергию вращающихся масс, вызывая неуправляемый рост частоты – частотный разгон.

Принципиальная трудность состоит в том, что традиционные комплексы противоаварийной автоматики не проектировались для подобных сценариев. Автоматическая частотная разгрузка (АЧР), являющаяся базовым средством сохранения устойчивости, ориентирована исключительно на отключение части нагрузки при глубоком снижении частоты и не содержит органов, реагирующих на ее аномальное повышение. Единственным противостоящим механизмом остаются встроенные в инверторы ФЭС защиты от превышения частоты (функция *ANSI 81O*), однако они срабатывают с заданной выдержкой времени, которая должна быть согласована с механической постоянной инерции вращающейся нагрузки. Проблема в том, что в сельских энергорайонах практически отсутствуют крупные синхронные двигатели

и генераторы, способные запастись кинетическую энергию, и механическая инерция системы пренебрежимо мала. Вследствие этого даже небольшой избыток активной мощности после изоляции приводит к лавинообразному росту частоты, и реле, настроенное на абсолютное значение частоты с задержкой, просто не успевает среагировать до того, как параметры режима станут недопустимыми.

Актуальность решения указанной проблемы подтверждается исследованиями. Предложена концепция адаптивных частотных систем (*Adaptive Frequency Islanding System – AFIS*), основная задача которых – оперативное восстановление баланса активной мощности непосредственно в момент выделения энергорайона на изолированную работу [12]. Выбор управляющих воздействий базируется на анализе текущего режима и параметров выделяемого фрагмента.

С целью повышения быстродействия обосновано применение реле скорости изменения частоты (*ROCOF, ANSI 81R*) [11]. Принцип основан на том, что возникающий в момент изоляции дисбаланс активной мощности приводит к появлению конечной производной частоты df/dt , измерение которой позволяет зафиксировать островной режим значительно быстрее, чем защиты, реагирующие на абсолютное отклонение частоты. Международный стандарт *IEEE 1547-2018* предписывает обнаружение непреднамеренного островного режима и отключение распределенной генерации в пределах 2 с.

Для исключения ложных срабатываний при кратковременных возмущениях, таких как коммутации нагрузки или КЗ, типичная задержка срабатывания реле *ROCOF* принимается около 500 мс, а уставки по скорости изменения частоты задаются в диапазоне 0,5-2,0 Гц/с. Разработан гибридный метод детектирования островного режима, объединяющий пассивный контроль частоты с активным мониторингом импеданса нагрузки, что обеспечивает надежную фиксацию событий, способных привести к образованию острова [12].

Отдельного рассмотрения предполагает вопрос координации реле *ROCOF* с традиционными частотными защитами. Предложен метод определения «области применения», позволяющий одновременно удовлетворять требованиям антиостровной защиты и частотного отключения [13]. Этот подход формализует процедуру оптимального выбора мгновенных и замедленных уставок для разнотипных частотных реле в унифицированной системе защит.

Применительно к российским условиям требования к устойчивости генерирующего оборудования при

выделении на изолированную нагрузку посредством частотной делительной автоматики регламентированы ГОСТ Р 71812-2024. Хотя стандарт разработан для тепловых электростанций, заложенные в нем принципы и методические положения могут быть адаптированы для объектов распределенной генерации, включая ФЭС, функционирующие в сельских распределительных сетях 6-10 кВ.

Сценарий Г. Деградация параметров настройки защит от однофазных замыканий на землю

Интеграция ФЭС в распределительные сети 6-10 кВ вносит существенные коррективы в работу защит от однофазных замыканий на землю – наиболее массового вида повреждений в данном классе напряжения. Классические токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), настроенные на фиксированные значения собственных емкостных токов присоединений, в новых условиях теряют селективность и чувствительность.

Далее систематизировали ключевые механизмы деградации параметров настройки.

1. Изменение суммарного емкостного тока сети.

Присоединение ФЭС привносит три группы дополнительных емкостных составляющих:

- собственная емкость повышающих трансформаторов 0,4/10 кВ, которая создает дополнительный путь для тока нулевой последовательности (ориентировочно 0,3-2,0 А на один трансформатор);
- кабельное хозяйство станции (до 4,2 А/км для кабелей большого сечения);
- емкость фильтров высших гармоник инверторов (LC- или LCL-фильтры) (типовой вклад – 0,2-1,0 А на один инвертор).

Суммарный прирост емкостного тока от одной ФЭС мощностью 2,5 МВт может составлять от 3 до 12 А. Для сети с исходным током ОЗЗ 20-30 А это изменение достигает 10-30%, что выводит уставки за пределы рабочего диапазона. Для повышения эффективности такой защиты предлагается метод, основанный на контроле емкости нулевой последовательности в кабельных сетях, что позволяет более точно настраивать компенсацию и повышать надежность обнаружения ОЗЗ [14].

2. Нарушение критерия отстройки и потеря чувствительности.

Традиционная методика выбора уставки токовой защиты от ОЗЗ базируется на условии согласно формуле:

$$I_{с.з.} = k_{зап} \cdot I_{с.собств.},$$

где $k_{зап} = 1,1-1,3$; $I_{с.собств.}$ – собственный емкостный ток защищаемого присоединения.

При добавлении ФЭС реальный емкостный ток фидера возрастает и, если он превышает $I_{с.з.}$, защита начинает ложно срабатывать при внешних замыканиях. При этом принудительное завышение уставки для исключения ложных срабатываний приводит к снижению чувствительности.

3. Искажение гармонического состава тока нулевой последовательности.

Инверторы ФЭС генерируют высшие гармоники (3-я, 5-я, 7-я и т.д.), которые накладываются на ток нулевой последовательности. В результате чего защиты, настроенные на первую гармонику (50 Гц), могут работать нестабильно из-за помех. Защиты, использующие контроль высших гармоник (например, для обнаружения ОЗЗ в сетях с дугогасящим реактором), теряют селективность, поскольку гармоники присутствуют в нормальном режиме работы ФЭС.

В совокупности вышеописанные факторы приводят к ложным срабатываниям нормально функционирующих фидеров, отказам при реальных ОЗЗ или неселективной работе защит. Для устранения этих явлений требуются пересмотр методик расчета уставок (с учетом реальных измерений в режиме максимальной генерации), применение направленных защит нулевой последовательности, а также внедрение адаптивных алгоритмов, отслеживающих активную составляющую тока замыкания или использующих динамическую настройку порогов по высшим гармоникам [15].

Результаты и обсуждение. Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие научно-технические выводы и практические рекомендации, которые сведены в *таблицу*.

Для эффективной интеграции ФЭС необходима комплексная модернизация распределительных сетей: замена ненаправленных защит, внедрение реле *ROCOF*, адаптация алгоритмов РПН и пересмотр методик расчета уставок защит от ОЗЗ.

На *рисунке 4* приведен пример возможной схемы распределения защит с учетом вышеописанных технических факторов. Цифровые терминалы РЗА обладают достаточными вычислительными ресурсами для реализации предложенных решений, однако необходима актуализация нормативной базы и повышение квалификации персонала.

Выводы. Интеграция фотоэлектрических станций в сельские распределительные сети 6-10 кВ трансформирует последние из пассивных радиальных конфигураций в активно-адаптивные структуры с двусторонними и многосторонними перетоками мощности. Указанная смена топологической модели сети вступает в фундаментальное противоречие с

Table			Таблица
Сводная таблица основных проблем РЗ при интеграции ФЭС Summary table of the main relay protection problems during PVS integration			
Сценарий	Тип защиты/автоматики	Основная проблема	Возможное решение
A1	Ненаправленная МТЗ	Ложное срабатывание при внешнем КЗ	Замена всех ненаправленных МТЗ на фидерах с присоединенными ФЭС на направленные аналоги
A2	Направленная МТЗ	Неразличение рабочего и аварийного обратного тока	При проектировании следует задавать угловую характеристику реле направления мощности с зоной нечувствительности, исключающей срабатывание при рабочих перетоках, и использовать быстродействующие алгоритмы обнаружения скачкообразного роста тока
Б	РПН	Ошибочное понижение напряжения при обратном токе	Переход на векторное регулирование с контролем реактивной мощности, а также введение логических блокировок, запрещающих регулирование «вниз» при наличии обратного потока активной мощности
В	АЧР, защита инверторов	Частотный разгон в «острове»	Оснащение присоединений ФЭС реле скорости изменения частоты (<i>ROCOF</i> , <i>ANSI 81R</i>) с уставками 0,5-2,0 Гц/с и выдержкой времени около 500 мс
Г	ТЗНП (на основе I_0)	Ложные срабатывания или отказы из-за изменения суммарного емкостного тока сети	Пересчет уставок по реальным измерениям в режиме максимальной генерации ФЭС; применение направленных защит нулевой последовательности

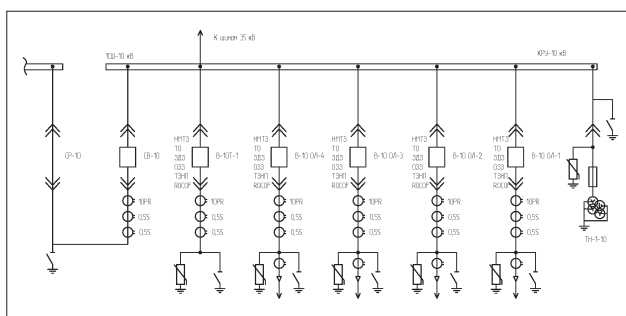


Рис. 4. Пример схемы распределения защит с учетом интеграции ФЭС в распределительные сети (6)10 кВ
Fig. 4. An example of a protection distribution scheme taking into account the integration of photovoltaic stations into distribution grids of (6)10 kV

классическими принципами построения релейной защиты, практически ориентированными исключительно на однонаправленное питание от центра к периферии.

В рамках выполненного исследования систематизировали пять типовых сценариев дезорганизации функционирования устройств релейной защиты и автоматики, инициируемых возникновением реверсивных потоков активной мощности. Для каждого из выделенных сценариев разработали и обосновали конкретные технические решения, учитывающие схемно-режимную специфику сельских электрических сетей.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на формирование экономически обоснованной методологии определения рационального объема модернизации комплекса РЗА в зависимости от до-

ли фотоэлектрической генерации в структуре присоединенной нагрузки, а также на создание унифицированных нормативно-технических требований к адаптации сельских распределительных сетей 6-10 кВ с распределенными возобновляемыми источниками.

Библиографический список

1. Цедяков А.А., Белов С.И., Стушкина Н.А. Аппроксимация кривой намагничивания сердечника датчика тока для релейных защит распределительных сетей 6-10 кВ // *Международный технико-экономический журнал*. 2021. N5. С. 41-47. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-80-5-41-47. EDN: YCVZYO.
2. Илюшин П.В. Учет особенностей объектов распределенной генерации при выборе алгоритмов противоаварийного управления в распределительных сетях // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2011. N4. С. 19-25. EDN: OCBLGZ.
3. Liang Ya., Li L., He J. et al. A Current Selective Tripping Protection Scheme for the Distribution Network with PV. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 17. 13109. DOI: 10.3390/su151713109. EDN: HOSHPB.
4. Самойленко В.О., Трапезников Д.А., Илюшин П.В. О стандартизации и унификации принципов построения релейной защиты фотоэлектрических станций // *Релейная защита и автоматизация*. 2020. N3(40). С. 10-25. EDN: SWTSTK.
5. Лачугин В.Ф., Волошин А.А., Коваленко А.И. и др. Система автоматизированного расчета парамет-

- ров срабатывания релейной защиты распределительной сети 6-35 кВ // *Электрические станции*. 2023. N9(1106). С. 18-25. DOI: 10.34831/EP.2023.1106.9.003. EDN: ZWZRNВ.
6. Gómez-Luna E., Candelo-Becerra J.E., Vasquez Ju.C. A new digital twins-based overcurrent protection scheme for distributed energy resources integrated distribution networks. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 14. 5545. DOI: 10.3390/en16145545. EDN: INVSKH.
 7. Orozco-Álvarez J., Herrera-Orozco A., Mora-Flórez J. Communication-less adaptive directional overcurrent protection strategy considering islanded mode detection in active distribution networks. *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. 101538. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101538. EDN: VTXKDO.
 8. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М., Шеповалова О.В. Оценка деградации мощности фотоэлектрических модулей при воздействии высокого напряжения // *Вестник ВИАЭСХ*. 2018. N3(32). С. 10-17. EDN: VKJTAK.
 9. Илюшин П.В. Анализ особенностей построения и функционирования релейной защиты и автоматики в распределительных сетях с объектами распределенной генерации // *Энергия единой сети*. 2020. N5(52). С. 24-35.
 10. Наумов И.В. Прогностическая оценка функционального состояния электрических сетей на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Самарские распределительные сети» // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2024. Т. 17. N1. С. 92-106. EDN: TURKEY.
 11. Vieira J.C.M., Freitas W., Xu W. et al. Efficient coordination of ROCOF and frequency relays for distributed generation protection by using the application region. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21. Iss. 4. 1878-1884. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881588.
 12. Гуревич В.И., Савченко П.И., Мороз С.А. Цифровые реле скорости измерения частоты и проблема их тестирования // *Релейная защита и автоматизация*. 2020. N2(39). С. 24-35.
 13. Mohamad H., Yasin Z.M., Salim N.A. et al. Hybrid islanding detection method based on the rate of change of frequency and load impedance. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2021. Vol. 10. Iss. 6. 2997-3006. DOI: 10.11591/eei.v10i6.3246. EDN: QSZEDR.
 14. Шуин В.А., Добрягина О.А., Шадрикова Т.Ю. и др. Защита от однофазных замыканий на землю на основе контроля емкости нулевой последовательности в кабельных сетях напряжением 6-10 кВ // *Электрические станции*. 2020. N11(1072). С. 25-34. EDN: GZQGHK.
 15. Зиганшин А.Г., Фардиев И.Ш., Степанов И.Н. и др. Использование быстрого преобразования Фурье для управления дугогасящим реактором с подмагничиванием // *Электрические станции*. 2023. N1(1098). С. 30-34. EDN: AIABCI.

References

1. Tsedyakov A.A., Belov S.I., Stushkina N.A. Approximation of the magnetization curve of the current sensor core for relay protection of 6-10 kV distribution grids. *International Technical and Economic Journal*. 2021. N5. 41-47 (In Russian). DOI: 10.34286/1995-4646-2021-80-5-41-47. EDN: YCVZYO.
2. Ilyushin P.V. Accounting for the features of distributed generation objects when choosing emergency control algorithms in distribution grids. *Elektro. Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electrical Industry*. 2011. N4. 19-25 (In Russian). EDN: OCBLGZ.
3. Liang Ya., Li L., He J. et al. A Current Selective Tripping Protection Scheme for the Distribution Network with PV. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 17. 13109. DOI: 10.3390/su151713109. EDN: HOSHPB.
4. Samoylenko V.O., Trapeznikov D.A., Ilyushin P.V. Towards standardization and unification of photovoltaic generation relay protection. *Relay Protection and Automation*. 2020. N3(40). 10-25 (In Russian). EDN: SWTSTK.
5. Lachugin V.F., Voloshin A.A., Kovalenko A.I. The system for automated calculation of the operation parameters of the relay protection of the distribution grids 6-35 kV. *Electrical Stations*. 2023. N9(1106). 18-25 (In Russian). DOI: 10.34831/EP.2023.1106.9.003. EDN: ZWZRNВ.
6. Gómez-Luna E., Candelo-Becerra J.E., Vasquez Ju.C. A new digital twins-based overcurrent protection scheme for distributed energy resources integrated distribution networks. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 14. 5545. DOI: 10.3390/en16145545. EDN: INVSKH.
7. Orozco-Álvarez J., Herrera-Orozco A., Mora-Flórez J. Communication-less adaptive directional overcurrent protection strategy considering islanded mode detection in active distribution networks. *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. 101538. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101538. EDN: VTXKDO.
8. Arbuzov Yu.D., Evdokimov V.M., Shepvalova O.V. Assessment of degradation of pv modules when exposed to high voltage. *Bulletin of VIESH*. 2018. N3(32). 10-17 (In Russian). EDN: VKJTAK.
9. Ilyushin P.V. Analysis of the design and operation features of relay protection and automation in distribution grids with distributed generation facilities. *Energy of the Unified Grid*. 2020. N5(52). 24-35 (In Russian).

10. Naumov I.V. Prognostic assessment of the electric networks functional state using the example of the PJSC «Rosseti Volga» – «Samara distribution grids branch». *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2024. Vol. 17. N1. 92-106 (In Russian). EDN: TURKEY.
11. Vieira J.C.M., Freitas W., Xu W. et al. Efficient coordination of ROCOF and frequency relays for distributed generation protection by using the application region. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21. Iss. 4. 1878-1884. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881588.
12. Gurevich V.I., Savchenko P.I., Moroz S.A. Digital frequency measurement speed relays and the problem of their testing. *Relay protection and automation*. 2020. N2(39). 24-35 (In Russian).
13. Mohamad H., Yasin Z.M., Salim N.A. et al. Hybrid islanding detection method based on the rate of change of frequency and load impedance. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2021. Vol. 10. Iss. 6. 2997-3006. DOI: 10.11591/eei.v10i6.3246. EDN: QSZEDR.
14. Shuin V., Dobriagina O., Shadrikova T. et al. Single-phase short circuits protection based on monitoring the zero-sequence capacitance in cable grids of 6-10 kV. *Electrical stations*. 2020. N11(1072). 25-34 (In Russian). EDN: GZQGHK.
15. Ziganshin A., Fardiev I., Stepanov I. et al. Using the fast Fourier transform to control of an arc suppression reactor with submagnetization. *Electrical stations*. 2023. N1(1098). 30-34 (In Russian). EDN: AIABCI.

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

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 26.05.2026

Статья принята к публикации 10.09.2026



Комплексные нечеткие модели и механизмы логического вывода в локальных экспертных системах электросетевого обслуживания

Шамсудин Зелимович Зиниев¹,

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

Николай Иванович Гданский^{2,3},

доктор технических наук, профессор;

Виталий Александрович Каргин^{2,4},

доктор технических наук, доцент

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

²Российский биотехнологический университет, Москва, Российская Федерация;

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация;

⁴Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация

Реферат. Переход электрических сетей к обслуживанию по фактическому техническому состоянию вместо жестких межремонтных интервалов осложняется стохастичностью дефектов и множеством влияющих факторов. Классические аналитические модели в таких условиях работают плохо, поэтому востребованы гибридные интеллектуальные подходы, сочетающие обработку экспертных знаний и численных данных. (Цель исследования) Выполнить синтез математических моделей и специализированных алгоритмов логического вывода, позволяющих трансформировать данные о текущих повреждениях конструктивных элементов территориальных электрических сетей в обоснованные рекомендации по выбору ремонтных стратегий. (Материалы и методы) Использовали аппарат нечеткой логики на базе максиминной алгебры Л. Заде для формализации продукционных правил в виде дизъюнктивных нормальных форм. Показали, что входные переменные – это технологические дефекты подсистем опор, проводников и подстанционного оборудования, их текущие значения и краткосрочный прогноз получают через искусственные нейронные сети с последующей нормировкой на отрезок $[0; 1]$. Реализовали механизм вывода по модифицированной схеме Сугено первого порядка, однофазный контур для однородных подсистем и двухфазный – для смешанных, где учитывается возможность замены совокупности локальных ремонтов одним капитальным. (Результаты и обсуждение) Разработали двухфазный алгоритм логического вывода, представленный в виде BPMN-диаграммы; на первой фазе оценивается необходимость капитального ремонта по отдельному правилу: если порог ($\delta = 0,7$) превышен, система дает директивную рекомендацию; в противном случае запускается вторая фаза, где определяется вектор актуальности локальных ремонтов, сортируется и вычисляется интегральный эффект накопленных дефектов. Выявили, что при критическом множестве мелких повреждений итоговый показатель достигает единицы, что делает локальные ремонты нецелесообразными. Установили порог отбора локальных мероприятий эмпирически. (Выводы) Предложили математический аппарат, который переводит качественные регламенты обслуживания сетей в формализованные вычислительные алгоритмы. Определили, что сочетание нейросетевого прогноза и нечеткой логики повышает адаптивность оценок; двухфазный механизм позволяет объективно определять границу, за которой накопление мелких дефектов требует не локального, а капитального ремонта, что дает оптимизацию затрат.

Ключевые слова: нейро-нечеткий вывод, сеть Сугено, искусственная нейронная сеть, максиминные операции, планирование ремонтов, локальная экспертная система, техническое состояние электрооборудования, электрические сети, надежность электроснабжения, прогнозирование аварийности.

Для цитирования: Зиниев Ш.З., Гданский Н.И., Каргин В.А. Комплексные нечеткие модели и механизмы логического вывода в локальных экспертных системах электросетевого обслуживания // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. С. 22-28. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-22-28. EDN: BFGLVR.

Scientific article

Complex Fuzzy Models and Inference Mechanisms in Local Expert Systems for Electric Grid Maintenance

Shamsudin Z. Ziniev¹,

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

Nikolay I. Gdanskiy^{2,3},

Dr.Sc.(Eng.), professor;

Vitaliy A. Kargin^{2,4},

Dr.Sc.(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;

³National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation;

⁴Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The transition of power grids to service on the actual technical condition instead of rigid repair intervals is complicated by stochasticity of defects and many influencing factors. Classic analytical models work poorly in such conditions, so hybrid intellectual approaches combining the processing of expert knowledge and numerical data are in demand. (Research purpose) The research purpose is performing a synthesis of mathematical models and specialized algorithms of logical inference, which allow transforming data on current damage to structural elements of territorial power grids into reasonable recommendations for choosing repair strategies. (Materials and methods) The apparatus of fuzzy logic based on the maximal algebra of L. Zadeh was used to formalize production rules in the form of disjunctive normal forms. It was shown that input variables are technological defects of subsystems of supports, conductors and substation equipment, their current values and short-term forecast are obtained through artificial neural networks with subsequent normalization by a segment [0; 1]. The output mechanism according to the modified Sugeno scheme of the first order, a single-phase circuit for homogeneous subsystems and a two-phase one for mixed ones were implemented, which takes into account the possibility of replacing a set of local repairs with one capital one. (Results and discussion) A two-phase logical inference algorithm was developed, presented in the form of a BPMN diagram; in the first phase, the need for overhaul is estimated according to a separate rule: if the threshold ($\delta = 0.7$) is exceeded, the system gives a directive recommendation; otherwise, the second phase is launched, where the vector of relevance of local repairs is determined, the integral effect of accumulated defects is sorted and calculated. It was revealed that with a critical set of minor damages, the final indicator reaches one, which makes local repairs inexpedient. We set the threshold for selecting local events empirically. (Conclusions) We proposed a mathematical apparatus that translates high-quality rules of grid maintenance into formalized computational algorithms. It was determined that the combination of neural network forecast and fuzzy logic increases the adaptability of estimates; the two-phase mechanism allows to objectively determine the boundary beyond which the accumulation of small defects requires not local, but major repairs, which provides cost optimization.*

Keywords: *neuro-fuzzy inference, Sugeno network, artificial neural network, maximin operations, repair planning, local expert system, technical condition of electrical equipment, electrical grids, power supply reliability, failure forecasting.*

For citation: Ziniev Sh.Z., Gdanskiy N.I., Kargin V.A. Complex fuzzy models and inference mechanisms in local expert systems for electric grid maintenance. *Electrotechnologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. 22-28 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-22-28. EDN: BFGLVR.

Долгое время в практике эксплуатации территориальных электрических сетей (ЭС) использовался принцип планово-предупредительного ремонта, жестко привязанный к межремонтным интервалам [1, 2]. Однако накопленный опыт показывает, что зачастую такой подход представляется экономически нецелесообразным. Так, например, в одних случаях оборудование ремонтируют, когда оно еще полностью работоспособно, в других – пропускают критический момент из-за того, что формальный срок не наступил. Переход к обслуживанию по фактическому техническому состоянию сетей имеет сложную, стохастическую природу [3, 4].

В частности, состояние опоры, провода или трансформатора зависит от ряда факторов, включая токовые нагрузки, ошибки проектирования, естественный износ материалов, климатические воздействия, случайные механические повреждения и другие [5, 6]. Классические аналитические модели, требующие точных вероятностных распределений или жестких функциональных зависимостей, в таких условиях работают неудовлетворительно, или чрезмерно упрощая модель, или требуя такого объема исходных данных, который на практике недоступен.

Таким образом, разработка математической модели на основе нечеткой логики для перевода качественных регламентов обслуживания сетей в формализованные вычислительные алгоритмы – актуальна.

Аппарат нечеткой логики рассчитан на работу с качественными, неточными экспертными оценками [7, 8]. Вместо того чтобы имитировать недостижимую точность нечеткие модели честно признают неопределенность и оперируют такими понятиями, как «степень выраженности дефекта» или «целесообразность ремонта». При этом итоговые рекомендации получают численными и допускают строгую интерпретацию. Вместе с тем большинство существующих разработок в этой области ориентированы либо на чисто диагностические задачи, либо на построение рейтингов аварийности [9, 10].

Цель исследования – выполнить синтез математических моделей и специализированных алгоритмов логического вывода, которые позволяют трансформировать данные о текущих повреждениях конструктивных элементов территориальных ЭС в обоснованные рекомендации по выбору ремонтных стратегий.

Материалы и методы. Исходя из общей теории экспертных систем для каждой разрабатываемой локальной экспертной системы (ЛЭС) должен быть задан ряд структурных компонентов, выполняющих

соответствующие функции: база данных, база знаний, механизм вывода [11, 12].

Входными нечеткими переменными (база данных) в проектируемой интеллектуальной системе выступают технологические дефекты, фиксируемые в подсистемах обслуживания опор, проводниковой части и подстанционного оборудования. Полный перечень таких переменных для каждого выделенного сегмента сети формирует упорядоченный массив возможных дефектов $\{D\}$.

Динамика развития этих дефектов определяется взаимным эффектом ряда независимых факторов, в том числе эксплуатационными и токовыми нагрузками в элементах сети; ошибками, допущенными на этапах проектирования или строительно-монтажных работ; естественным износом и деградацией свойств конструкционных материалов; топографическими и рельефными особенностями местности трассировки линий; климатическими факторами, например, ветровыми нагрузками, гололедообразованием, температурными колебаниями; прямыми механическими повреждениями сторонними объектами; степенью агрессивности окружающей среды.

Для оценки текущих значений переменных из массива $\{D\}$ и их прогнозирования на заданный дискретный интервал времени предложено использовать искусственные нейронные сети (ИНС), осуществляющие мониторинг и анализ поведения распределительной системы во времени, учитывая предысторию процесса, накопленную на предшествующих временных отрезках [13, 14].

С целью обеспечения корректной интеграции полученных сведений в нечеткую экспертную систему все численные выходы нейросетевых моделей подвергаются процедуре нормирования, переводящей их значения на фиксированный отрезок $[0; 1]$, где значение «0» соответствует идеальному техническому состоянию, а «1» – критической степени выраженности дефекта.

База знаний ЛЭС аккумулирует формализованный опыт экспертов в виде системы продукционных правил типа «если..., то...» [15, 16]. В общем виде нечеткое правило R_i устанавливает причинно-следственную связь между степенью выраженности дефектов и целесообразностью выполнения конкретного ремонтного мероприятия PM_i :

$$R_i: P_i(\{D\}) \rightarrow PM_i,$$

где $P_i(\{D\})$ представляет собой посылку правила, выраженную в форме логического высказывания о комбинации дефектов;

PM_i – получаемый в результате импликации не-

четкий вывод о необходимости ремонта.

Для аналитического представления посылок $P_i(\{D\})$ принята форма дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ):

$$P_i(\{D\}) = M_1 \vee M_2 \vee \dots \vee M_m,$$

где элементы M_j – конъюнкции, то есть логические произведения нормированных переменных дефектов или их нечетких отрицаний. Специфика предметной области накладывает ограничение: ни одно из произведений M_j не может состоять исключительно из отрицаний, поскольку полное отсутствие дефектов априори исключает потребность в ремонте.

В качестве математического базиса для выполнения логических операций принята максиминная система Л. Заде. Нечеткое отрицание (дополнение) вычисляется как $\bar{x} = 1 - x$. Для бинарных операций конъюнкции (&) и дизъюнкции (∨) используются функции нахождения минимума и максимума соответственно:

$$\begin{cases} x \& y = \min(x, y); \\ x \vee y = \max(x, y). \end{cases}$$

При расчете истинности посылок соблюдается классический приоритет операций: в первую очередь вычисляются нечеткие отрицания, затем – логические минимумы в конъюнкциях, и на финальном этапе – логический максимум полученных компонент. Выбор максиминной алгебры обусловлен тем, что в ней сохраняется справедливость всех базовых законов и аксиом теории множеств, что существенно упрощает процедуры последующей верификации баз знаний [17, 18].

Механизмы логического вывода – общий алгоритм, который управляет работой системы, то есть построением в ней вывода необходимых рекомендательных предложений по имеющимся фактическим данным. В качестве ядра вычислительного блока ЛЭС принята модифицированная нечеткая модель Сугено первого порядка [19]. В зависимости от структуры ремонтного цикла подсистемы (однородной или смешанной) применяются однофазный и двухфазный механизм вывода.

Однофазный контур вывода – это алгоритм, ориентированный на однородные ЛЭС, где предусмотрены исключительно локальные мероприятия по текущему ремонту элементов, например, ЛЭС силовой подстанции. Сведения о дефектах, транслируемые из ИНС, параллельно подставляются во все доступные продукционные правила базы знаний.

Значение истинности μ посылки напрямую переносится на значение истинности вывода:

$$\mu(PM_i) = \mu(P_i(\{D\})). \quad (1)$$

Формирование рекомендательного списка ремонтных процедур L_{PM} осуществляется путем отсечения тех мероприятий, расчетная истинность μ которых оказалась ниже эмпирически установленного порога δ ($\delta = 0,7$):

$$L_{PM} = \{PM_i \mid \mu(PM_i) \geq \delta\}. \quad (2)$$

Двухфазный контур вывода применяется в смешанных ЛЭС, например, для опор, проводников и трансформаторов, где наряду с текущими ремонтами (РДТ) присутствует комплексный капитальный ремонт (РДК), способный технологически поглотить локальные воздействия.

Результаты и обсуждение. На основе заданных структурных компонентов, локальной экспертной системы разработали алгоритм двухфазного механизма вывода, BPMN-диаграмма которого приведена на [рисунке](#) [20].

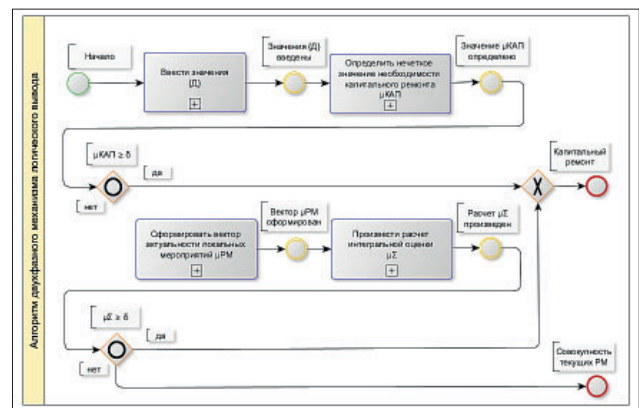


Рис. BPMN-диаграмма алгоритма двухфазного механизма логического вывода

Fig. BPMN diagram of the algorithm for the two-phase inference mechanism

Вначале рассчитывается нечеткое значение необходимости капитального ремонта $\mu_{КАП}$ путем подстановки вектора дефектов в изолированное правило капитального ремонта РДК:

$$\mu_{КАП} = \mu_{РДК}(\{D\}). \quad (3)$$

Если полученный показатель превосходит установленный порог $\mu_{КАП} \geq \delta$, то алгоритм немедленно завершает работу, выдавая директивную рекомендацию к проведению капитального ремонта без детального анализа локальных подсистем. В противном случае при $\mu_{КАП} < \delta$ система инициирует вторую фазу вывода.

На втором этапе нечеткие значения дефектов подставляются в k правил текущего ремонта, в ре-

зультате чего формируется вектор актуальности локальных мероприятий:

$$\bar{\mu}_{PM} = (\mu_{PM_1}(\{\mathcal{D}\}), \mu_{PM_2}(\{\mathcal{D}\}), \dots, \mu_{PM_k}(\{\mathcal{D}\})). \quad (4)$$

Компоненты полученного вектора сортируются по невозрастанию:

$$\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_k.$$

Данный ряд подставляется в разработанную обобщенную формулу интегральной оценки μ_Σ , которая учитывает накопленный эффект от совокупности локальных дефектов:

$$\mu_\Sigma = \mu_{КАП} + \frac{2^k (1 - \mu_{КАП}) \left[\frac{\mu_1}{2^1} + \frac{\mu_2}{2^2} + \dots + \frac{\mu_k}{2^k} \right]}{2^k - 1}. \quad (5)$$

В гипотетическом случае, когда все текущие дефекты достигают своего максимума $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = 1$, выражение в квадратных скобках представляет собой сумму геометрической прогрессии, равную $(2^k - 1)/2^k$. В этой ситуации выражение (5) принимает вид:

$$\mu_\Sigma = \mu_{КАП} + (1 - \mu_{КАП}) = 1. \quad (6)$$

Таким образом, любое исходное значение $\mu_{КАП}$ при критическом множественном накоплении мелких повреждений будет дополнено до единицы.

На финальном шаге производится сравнение (рис.): если вычисленное интегральное значение $\mu_\Sigma \geq \delta$, то совокупность текущих ремонтов признается экономически и технологически целесообразной, и система рекомендует проведение одного капитального ремонта. Если же значение $\mu_\Sigma < \delta$, то капитальный ремонт отклоняется, а к реализации предписывается набор текущих ремонтных процедур, чья индивидуальная значимость преодолела барьер δ .

Выводы. Разработанный математический аппарат позволяет перевести качественные экспертные регламенты обслуживания электросетевого хозяйства в формализованные алгоритмы вычислительных комплексов. Применение предиктивных моделей искусственных нейронных сетей совместно с максиминными правилами обеспечивает высокую адаптивность оценок технического состояния элементов территориальных ЭС.

Предложенный двухфазный механизм нечеткого логического вывода решает важную прикладную задачу оптимизации затрат, что дает возможность математически строго определить ту границу, за которой лавинообразный рост мелких дефектов делает локальные ремонты бессмысленными, и формирует объективное требование к проведению комплексного капитального ремонта объекта.

Библиографический список

1. 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.
2. Nurulin Yu.R., Skvortsova I.V., Konovalova O.A. Innovation Management Models in the Energy Sector. *International Journal of Technology*. 2023. Vol. 14. Iss. 8. 1759. DOI: 10.14716/ijtech.v14i8.6846. EDN: WLJUQG.
3. Зиниев Ш.З., Каргин В.А., Кротов И.В. и др. Прогнозирование отказов воздушных линий 35 кВ на основе нейросети для обеспечения надежности электроснабжения агропромышленного комплекса // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2026. N2(256). С. 79-85. DOI: 10.53083/1996-4277-2026-256-2-79-85. EDN: BUYPLN.
4. Зиниев Ш.З., Каргин В.А., Усанов К.М. Методологические основы обеспечения надежности в сельской электроэнергетике // *Аграрный научный журнал*. 2025. N12. С. 164-171. DOI: 10.28983/asj.y2025i12pp164-171. EDN: ACCEQQ.
5. Esmaeili Nezhad A., Samimi M.H. A review of the applications of machine learning in the condition monitoring of transformers. *Energy Systems*. 2022. DOI: 10.1007/s12667-022-00532-5. EDN: HONNPJ.
6. 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.
7. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Использование нечеткой нейронной сети для оценки энергоэффективности предприятий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. N8. С. 580-589. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-580-581. EDN: SAQODE.
8. Агапов А.А., Костоготов А.А., Лазаренко С.В. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2023. N1(89). С. 126-135. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_126. EDN: MAFVEV.
9. Luo R., Ren J., Shi K. Stability analysis of delayed T-S fuzzy power system via a cubic function negative determination lemma. *Nonlinear Dynamics*. 2024. DOI: 10.1007/s11071-024-10505-1. EDN: YHUXFF.

10. El-Rahim A.G.A., Ibrahim Kh.H., Ibrahim M.S. et al. Fuzzy logic-based transformer fault diagnosis employing roger's and IEC techniques. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2025. Vol. 72. N1. 265. DOI: 10.1186/s44147-025-00851-1. EDN: AFUMCU.
11. Бразовская В.В. Разработка инструмента принятия решений о реализации проектов возобновляемой энергетики в регионах РФ // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2023. N5(49). С. 43-49. EDN: LUEPZK.
12. Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г. и др. Интеллектуальная система идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности энергетического оборудования // *Промышленная энергетика*. 2024. N3. С. 8-17. DOI: 10.34831/EP.2024.23.60.002. EDN: NDSBDA.
13. Кучеренко Д.Е., Кучеренко Р.Е., Березовец И.О. и др. Перспективы использования нейронных сетей в энергетике // *Сельский механизатор*. 2024. N4. С. 38-39. DOI: 10.47336/0131-7393-2024-4-38-39. EDN: KNBBWJ.
14. 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.
15. Фомин И.Н. Онтологии в проектировании промышленных цифровых платформ // *Онтология проектирования*. 2025. Т. 15. N4(58). С. 535-551. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-535-551. EDN: ADUTFF.
16. Массель Л.В., Массель А.Г. Построение экосистемы знаний на основе ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике // *Вестник Югорского государственного университета*. 2023. N4. С. 78-87. DOI: 10.18822/byusu20230478-87. EDN: TOSKOL.
17. Бобылев В.Н. Об исчислении нечетких переменных по образу и подобию подсчета и оценки запасов и ресурсов полезных ископаемых // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2025. N5. С. 141-150. DOI: 10.7868/s3034644425050118. EDN: ZMLXYC.
18. Черняев А.П., Сухорукова И.В., Меерсон А.Ю. Применение нечеткой логики для систем искусственного интеллекта // *Мягкие измерения и вычисления*. 2025. Т. 93. N8. С. 20-27. DOI: 10.36871/2618-9976.2025.08.003. EDN: WZMVMM.
19. Лунева А.А., Лунева С.Ю. Параметрический синтез нечеткой системы управления типа Такаги-Сугено // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2025. N5. С. 124-127. EDN: ABXACF.
20. Хасенова К.К., Муратбеков Е.Д., Абенов Е.М. Цифровизация управления: применение BPMN для улучшения бизнес-процессов // *Экономическая серия Вестника ЕНУ им. Л.Н. Гумилева*. 2025. N1. С. 67-83. DOI: 10.32523/2789-4320-2025-1-67-83. EDN: XTZLJL.

References

1. 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.
2. Nurulin Yu.R., Skvortsova I.V., Konovalova O.A. Innovation Management Models in the Energy Sector. *International Journal of Technology*. 2023. Vol. 14. Iss. 8. 1759. DOI: 10.14716/ijtech.v14i8.6846. EDN: WLJUQG.
3. Ziniev Sh.Z., Kargin V.A., Krotov I.V. et al. Forecasting failures of 35-kv overhead power lines using a neural network to enhance power supply reliability in the agro-industrial complex. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2026. N2(256). 79-85 (In Russian). DOI: 10.53083/1996-4277-2026-256-2-79-85. EDN: BUYPLN.
4. Ziniev Sh.Z., Kargin V.A., Usanov K.M. Methodological foundations of reliability assurance in rural electric power industry. *The Agrarian Scientific Journal*. 2025. N12. 164-171 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2025i12pp164-171. EDN: ACCEQQ.
5. Esmaeili Nezhad A., Samimi M.H. A review of the applications of machine learning in the condition monitoring of transformers. *Energy Systems*. 2022. DOI: 10.1007/s12667-022-00532-5. EDN: HONNPJ.
6. 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.
7. Biryulin V.I., Kudelina D.V. Development of the fuzzy inference systems for assessing the efficiency of the energy resources use. *Bulletin of Tula State University*. 2023. N8. 580-589 (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-580-581. EDN: SAQODE.
8. Agapov A.A., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Analysis of the efficiency of quasi-optimal control laws using fuzzy logic apparatus in tasks of intellectualization of transport systems. *Bulletin of Rostov State University of Railways*. 2023. N1(89). 126-135 (In Russian). DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_126. EDN: MAFVEV.

9. Luo R., Ren J. Shi K. Stability analysis of delayed T-S fuzzy power system via a cubic function negative determination lemma. *Nonlinear Dynamics*. 2024. DOI: 10.1007/s11071-024-10505-1. EDN: YHUXFF.
10. El-Rahim A.G.A., Ibrahim Kh.H., Ibrahim M.S. et al. Fuzzy logic-based transformer fault diagnosis employing roger's and IEC techniques. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2025. Vol. 72. N1. 265. DOI: 10.1186/s44147-025-00851-1. EDN: AFUMCU.
11. Brazovskaya V.V. Development of a decision-making tool for the implementation of renewable energy projects in the Russian regions. *Natural Sciences and Humanities Research*. 2023. N5(49). 43-49 (In Russian). EDN: LUEPZK.
12. Bashirov M.G., Bashirova E.M., Yusupova I.G. et al. Intelligent system for identification of the stress-strain state and damage of power equipment. *Industrial Power Engineering*. 2024. N3. 8-17 (In Russian). DOI: 10.34831/EP.2024.23.60.002. EDN: NDSBDA.
13. Kucherenko D.E., Kucherenko R.E., Berezovets I.O. et al. Prospects for using neural networks in the energy industry. *Rural Machine Operator*. 2024. N4. 38-39 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2024-4-38-39. EDN: KNBBWJ.
14. 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.
15. Fomin I.N. Ontologies in designing industrial digital platforms. *Ontology of Designing*. 2025. Vol. 15. N4(58). 535-551 (In Russian). DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-535-551. EDN: ADUTFF.
16. Massel L.V., Massel A.G. Building a knowledge ecosystem based on it-infrastructure of system research in energy. *Bulletin of Yugra State University*. 2023. N4. 78-87 (In Russian). DOI: 10.18822/byusu20230478-87. EDN: TOCKOL.
17. Bobylev V.N. On the calculus of fuzzy variables in the image and likeness of counting and estimating mineral reserves and resources. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2025. N5. 141-150 (In Russian). DOI: 10.7868/s3034644425050118. EDN: ZMLXYC.
18. Chernyaev A.P., Sukhorukova I.V., Meerson A.Yu. Application of fuzzy logic to artificial intelligence systems. *Soft Measurements and Computing*. 2025. Vol. 93. N8. 20-27 (In Russian). DOI: 10.36871/2618-9976.2025.08.003. EDN: WZMVMM.
19. Luneva A.A., Luneva S.Y. Parametric synthesis of Takagi-Sugeno fuzzy control system. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2025. N5. 124-127 (In Russian). EDN: ABXACF.
20. Khasenova K.K., Muratbekov E.D., Abenov Y.M. Digitalization of management: application of BPMN to improve business processes. *Economic Series of the Bulletin of L.N. Gumilyov ENU*. 2025. N1. 67-83 (In Russian). DOI: 10.32523/2789-4320-2025-1-67-83. EDN: XTZLJL.

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 26.05.2026

Статья принята к публикации 10.06.2026



Разработка лабораторного стенда и оценка работы водородного топливного элемента для обеспечения электроэнергией бортовой сети БВС

Максим Алексеевич Литвинов,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: litvvinov.max@yandex.ru;

Станислав Иванович Кривко,

инженер

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России FGUN-2025-0015.

Реферат. В условиях развития цифрового точного земледелия и мониторинга сельскохозяйственных угодий увеличение полетного времени беспилотных воздушных судов ограничивается удельной энергоемкостью традиционных литий-полимерных аккумуляторов. Водородные топливные элементы обеспечивают до пяти раз более высокую энергоемкость, однако отсутствие серийных миниатюрных контроллеров питания и нестабильность выходных параметров ВТЭ при динамических нагрузках требуют предварительного моделирования. (Цель исследования) Разработать лабораторный стенд для оценки рабочих характеристик РЕМ-мембран и методом масштабирования обосновать параметры энергоустановки БВС с размером рамы 750 миллиметров. (Материалы и методы) Разработали лабораторный стенд, включающий РЕМ-электролизер, лабораторную ячейку с РЕМ-мембраной, электродвигатель и измерительные приборы. Выполнили на основе вольтамперных характеристик РЕМ-мембраны масштабирование показателей для определения параметров топливной установки под целевые требования аккумуляторной батареи беспилотных воздушных судов. (Результаты и обсуждение) Установили линейную зависимость электрических показателей ячейки от интенсивности обдува. Показали, что при площади продувочного окна 149,76 квадратных миллиметров достигнуто напряжение 0,6 вольт. Определили в ходе расчета, что для питания бортовой сети беспилотных воздушных судов напряжением 25,2 вольт необходима сборка из 42 последовательно соединенных ячеек суммарной площадью 0,19 квадратных метра. Выявили, что площадь обдува одной ячейки составляет $4,49 \cdot 10^{-3}$ квадратных метра для обеспечения максимальной токоотдачи 40 ампер; при плотности тока 0,89 ампер на квадратный сантиметр необходим расход водорода $1,95 \cdot 10^{-4}$ кубический метр в секунду. (Выводы) Разработали лабораторный стенд, который позволяет оценить работу водородного топливного элемента и его способность обеспечивать электроэнергией компоненты беспилотных воздушных судов методом масштабирования показателей лабораторной РЕМ-мембраны. Констатировали, что полученные параметры топливного элемента формируют основу для проектирования контроллера питания бортовой сети питания.

Ключевые слова: БВС, водородные топливные элементы, лабораторные исследования, лабораторный стенд, вольтамперные характеристики, РЕМ-мембраны.

Для цитирования: Литвинов М.А., Кривко С.И. Разработка лабораторного стенда и оценка работы водородного топливного элемента для обеспечения электроэнергией бортовой сети БВС // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 29-35. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-29-35. EDN: BPAZTI.

Scientific article

Development of a Laboratory Test Bench and Evaluation of the Performance of a Hydrogen Fuel Cell for Powering the Onboard Electrical System of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Maksim A. Litvinov,

Ph.D.(Eng.), senior researcher, e-mail: litvvinov.max@yandex.ru;

Stanislav I. Krivko,
engineer

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia, project FGUN-2025-0015.

Abstract. *In the context of the development of digital precision agriculture and monitoring of agricultural land, the increase in the flight time of unmanned aircraft is limited by the specific energy intensity of traditional lithium-polymer batteries. Hydrogen fuel cells provide up to five times higher energy intensity, but the absence of serial miniature power controllers and the instability of HFC output parameters under dynamic loads require preliminary modeling. (Research purpose) The research purpose is developing a laboratory stand to assess the performance of PEM membranes and, by scaling, substantiate the parameters of a UAV power plant with a frame size of 750 mm. (Materials and methods) A laboratory stand was developed, including a PEM electrolyser, a laboratory cell with a PEM membrane, an electric motor and measuring instruments. Based on the voltage-current characteristics of the PEM membrane, scaling of indicators was performed to determine the parameters of the fuel plant for the target requirements of the battery of unmanned aircraft. (Results and discussion) We have established a linear dependence of the electrical parameters of the cell on the intensity of the blowing. It was shown that with a purge window area of 149.76 square millimeters, a voltage of 0.6 V was achieved. It was determined during the calculation that to power the onboard network of unmanned aircraft with a voltage of 25.2 Volts, an assembly of 42 consecutively connected cells with a total area of 0.19 square meters is necessary. It was found that the area of blowing one cell is 4.49×10^{-3} square meters to ensure maximum current output of 40 amperes; with a current density of 0.89 amperes per square centimeter, hydrogen consumption is required 1.95×10^{-4} cubic meters per second. (Conclusions) We have developed a laboratory stand that allows us to evaluate the operation of the hydrogen fuel cell and its ability to provide electricity to the components of unmanned aircraft by scaling the laboratory PEM membrane. It was stated that the obtained parameters of the fuel cell form the basis for the design of the power controller of the onboard power supply network.*

Keywords: UAV, hydrogen fuel cells, laboratory studies, laboratory test bench, voltage-current characteristics of a PEM membrane.

For citation: Litvinov M.A., Krivko S.I. Development of a laboratory test bench and evaluation of the performance of a hydrogen fuel cell for powering the onboard electrical system of an unmanned aerial vehicle (UAV). *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 29-35 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-29-35. EDN: BPAZTI.

Внедрение инновационных цифровых технологий, интеллектуальных систем и роботизированных технических средств признано одним из ключевых приоритетов научно-технологического развития отечественного сельского хозяйства [1]. В рамках данной концепции особое значение приобретает широкое применение беспилотных авиационных систем (БАС), используемых для задач непрерывного автоматизированного мониторинга и оценки территорий.

Однако увеличение полетного времени беспилотного воздушного судна (БВС) упирается в ограничения энергетических установок [2]. Традиционные источники энергии подошли к своему теорети-

ческому потолку для БАС следующего поколения (по удельной энергоёмкости, Вт·ч/кг). Увеличение времени полета напрямую ведет к росту массы и объема батарей. Водородные топливные элементы предлагают до пяти раз более высокую удельную энергоёмкость по сравнению с литий-полимерными аккумуляторными батареями.

Однако при разработке БВС на водородных топливных элементах отсутствуют миниатюрные серийные контроллеры питания, что делает невозможным крупноузловую сборку БВС из готовых компонентов. В отличие от аккумуляторных батарей, выходные характеристики водородных топливных элементов (напряжение, ток) нестабильны и сильно зависят

от тока нагрузки (резкое увеличение потребления тока при наборе высоты или резких маневрах), состояния мембраны (увлажненность, температура) и подачи топлива (расход водорода и воздуха) [3]. Лабораторный стенд позволит оценить вырабатываемую мощность водородной топливной ячейки, а также проанализировать динамику процесса при приложении нагрузки на вал ротора и регулировать расход водорода на обдув элемента во время полета.

Цель исследования – разработать лабораторный стенд для оценки рабочих характеристик *PEM*-мембран и методом масштабирования обосновать параметры энергоустановки БВС с размером рамы 750 мм.

Материалы и методы. Поскольку для проведения испытаний топливной ячейки с *PEM*-мембраной необходим чистый водород, использование хранилища водорода под высоким давлением сопряжено с рисками утечек и воспламенения газа. Применение электролизера дает возможность упростить конструкцию лабораторного стенда, обеспечить безопасность и контроль процесса обдува мембраны за счет точного дозирования выработки газа и контроля давления в колбе изменением мощности электрического тока источника питания. Для выбора используемого в лабораторном стенде электролизера составлена морфологическая таблица 1, где отображены параметры трех основных типов электролизеров: *PEM*, пластинчатый с щелочным электролитом и пластинчатый с кислотным электролитом.

Как видно из таблицы 1, *PEM*-электролизер имеет преимущества перед пластинчатыми, которые в качестве электролита используют растворы щелочей и кислот, поскольку применяет в качестве электролита протонно-обменную мембрану и заправляется дистиллированной или деионизированной водой. КПД топливной ячейки с *PEM*-мембраной зависит

от чистоты водорода, и *PEM*-электролизер способен обеспечить чистоту газа более 99%. К тому же наличие паров щелочей и кислот в газе при использовании пластинчатых электролизеров способствует засорению *PEM*-мембраны, поэтому целесообразно применять *PEM*-электролизер, который обладает и большей плотностью тока, что снизит нагрузку на источник питания.

В качестве топливной ячейки взята лабораторная *PEM*-мембрана (рис. 1), так как ее состав типа *Nafion* используется в большинстве топливных элементов [4, 5]. Данное сходство позволит оценить в лабораторных условиях влияние интенсивности обдува топливного элемента на эффективность производства электроэнергии для БВС с размером рамы 750 мм.



Рис. 1. Лабораторная *PEM*-мембрана
Fig. 1. Laboratory *PEM* membrane

Разработанная схема лабораторного стенда (рис. 2) представляет собой сборку модульного типа, состоящую из лабораторного источника питания, лабораторной *PEM*-мембраны, нагрузки в виде электродвигателя, вольтметра и миллиамперметра. Применение кислорода для обдува катода *PEM* то-

Table 1		Таблица 1	
Сравнительные характеристики электролизеров / Comparative characteristics of electrolyzers			
Параметр	PEM-электролизер	Щелочной электролизер	Кислотный электролизер
Тип электролита	Твердая протонно-обменная мембрана	Водный раствор щелочи (KOH, NaOH 20-30%)	Водный раствор серной кислоты (H2SO4 10-20%)
Рабочая температура	20-80 °C	60-90 °C	40-70 °C
Рабочее давление	До 3 МПа	До 0,5 МПа	До 0,3 МПа
Чистота получаемого H2	От 99%	До 98%, возможно попадание паров щелочи в газе	До 97%, возможны пары кислоты в газе
Плотность тока	До 2 А/см²	0,2-0,4 А/см²	0,3-0,6 А/см²
Используемые материалы электродов	Благородные металлы (Pt, Ir, Ru)	Сплавы Ni, Fe, Co	Материалы, стойкие к кислоте (графит, Pb, Ti)
Экологическая безопасность	Полностью безопасен	Необходима утилизация щелочи	Требуется утилизация кислоты

пливной ячейки повышает эффективность производства энергии, однако при концентрации в воздухе кислорода свыше 31% не дает значимой прибавки для роста напряжения и силы тока [6]. Этот показатель концентрации O₂ на катоде возможно достичь при обдуве катода ячейкой вентиляторами охлаждения, создающими избыточное давление и дополнительный объем поступающего атмосферного воздуха. Поэтому дополнительный обдув катода кислородом нецелесообразен ввиду повышения массы БВС за счет установки дополнительного хранилища для кислорода и пневматической системы, а также возрастает вероятность образования стехиометрической смеси газа Брауна при утечках, которая существенно снижает безопасность эксплуатации БВС.

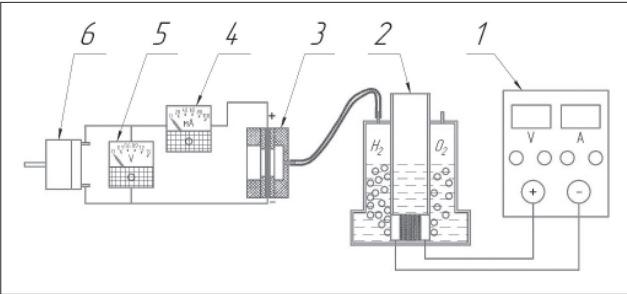


Рис. 2. Схема лабораторного стенда: 1 – лабораторный блок питания; 2 – *PEM*-электролизер; 3 – лабораторная *PEM*-мембрана; 4 – миллиамперметр; 5 – вольтметр; 6 – электродвигатель

Fig. 2. Diagram of the laboratory stand: 1 – laboratory power supply; 2 – *PEM* electrolyzer; 3 – laboratory *PEM* membrane; 4 – milliammeter; 5 – voltmeter; 6 – electric motor

Разработали лабораторный стенд, общий вид которого представлен на *рисунке 3*. Проведение исследований на стенде позволит оценить работу водородного топливного элемента и его способность обеспечивать электроэнергией бортовую сеть БВС методом масштабирования лабораторной *PEM*-мембраны.

Важнейшие показатели для оценки характеристик *PEM*-мембраны: напряжения и сила произ-

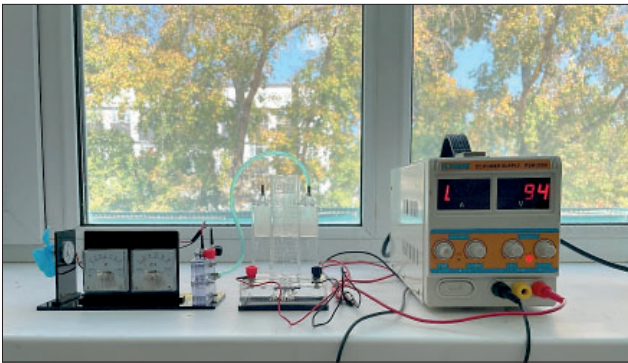


Рис. 3. Общий вид лабораторного стенда
Fig. 3. General view of the laboratory stand

водимого тока при различных режимах расхода водорода [7].

Исследования провели с помощью измерительного оборудования. Для оценки технических характеристик применили вольтметр, миллиамперметр, лабораторный блок питания и мультиметр *IEK MY64*. Список измерительного оборудования, единицы измерения и погрешность представлены в *таблице 2*.

Лабораторные испытания на разработанном лабораторном стенде выполнили с установленной нагрузкой в виде электрического двигателя, которая позволяет оценить изменение потребляемой мощности при различных режимах обдува топливной ячейки. Для регулирования объема вырабатываемого водорода на лабораторном блоке питания с шагом 1 В изменяется напряжение, поступающее на контакты электролизера. Напряжение питания электролизера находится в диапазоне от 6 до 12 В согласно инструкции к лабораторной *PEM*-мембране.

Методика проведения лабораторных исследований *PEM* топливного элемента заключается в сравнении показателей вырабатываемой мощности в зависимости от количества поступающего водорода на анод. Перед каждым измерением напряжения и номинальной силы тока и короткого замыкания дистиллированная вода в электролизере охлаждается и доливается до одинакового уровня при каждом этапе измерения, чтобы исключить погрешности выраба-

Измерительное оборудование / Measuring equipment				
Измерительный инструмент	Оцениваемый параметр	Единица измерения	Погрешность измерений	Диапазон измерений
Лабораторный блок питания <i>Element PSN-30SD</i>	Входное напряжение элетролизера	Вольт	±2 мВ	0-30 В
	Потребляемая сила тока электролизера	Ампер	±3 мА	0-5 А
Мультиметр <i>IEK MY64</i>	Напряжение	Вольт	0,5%	0-600 В
	Потребляемая сила тока	Ампер	0,8%	0-10 А
Миллиамперметр	Потребляемая сила тока нагрузки	Миллиампер	5%	0-100 мА
Вольтметр	Напряжение нагрузки	Вольт	5%	0-1,5 В

тываемого водорода из-за изменения скорости реакции при росте температур. Данные фиксируются при устоявшихся показаниях измерительных приборов в течение 30 мин. По окончании измерений основных показателей сведения усредняются по повторностям.

Результаты и обсуждение. Результаты измерений лабораторного эксперимента приведены в *таблице 3*.

Основываясь на полученных данных, строятся диаграммы, которые дадут возможность проанализировать изменение характеристик *РЕМ* топливного элемента при изменении расхода водорода. На *рисунке 4* показано изменение получаемого напряжения при увеличении интенсивности обдува анода *РЕМ*-мембраны. Наблюдается линейный рост напряжения, наиболее высокие показатели 0,6 В достигаются при значениях расхода газа свыше $1 \cdot 10^{-3}$ л/ч.

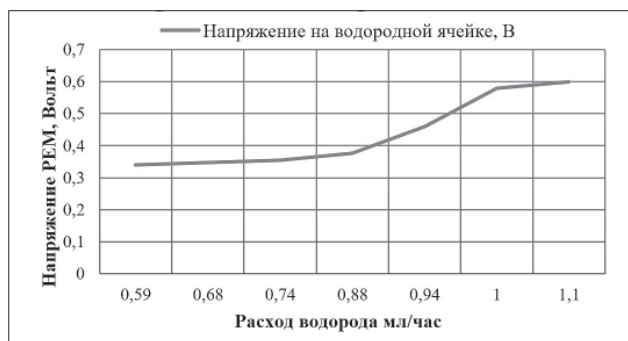


Рис. 4. Изменение получаемого напряжения при увеличении интенсивности обдува

Fig. 4. Change in the resulting voltage with an increase in the airflow intensity

Следует учесть, что сила тока, потребляемая нагрузкой, служит номинальным режимом работы, а сила тока короткого замыкания – максимальным режимом работы. Исходя из этого построен график на *рисунке 5*, отображающий силу тока, которую способен развить топливный элемент в зависимости от интенсивности обдува анода топливного элемента водородом, наблюдается линейная зависимость

роста силы тока топливного элемента при увеличении интенсивности обдува. Как видно из графиков, номинальный режим потребления тока достигает максимума 18 мА при значениях расхода водорода более 1 мл/ч, а максимальный 58 мА – при 1,1 мл/ч.

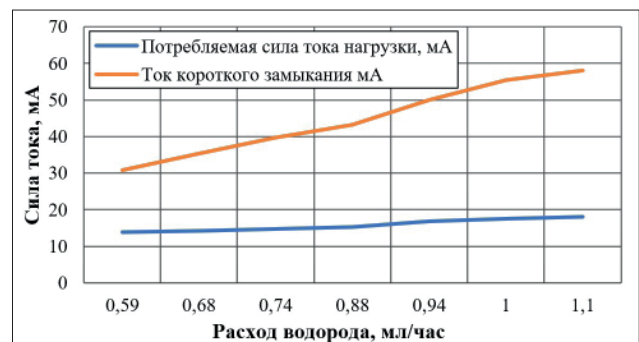


Рис. 5. Изменение номинальной и максимальной силы тока топливного элемента при увеличении интенсивности обдува

Fig. 5. Changes in the rated and maximum current of a fuel cell with an increase in airflow intensity

Топливный элемент, установленный в лабораторном стенде, имеет определенную форму продувочного окна, представленного на *рисунке 6*. Для установления эффективной площади *РЕМ*-мембраны рассчитали площадь обдуваемого участка.

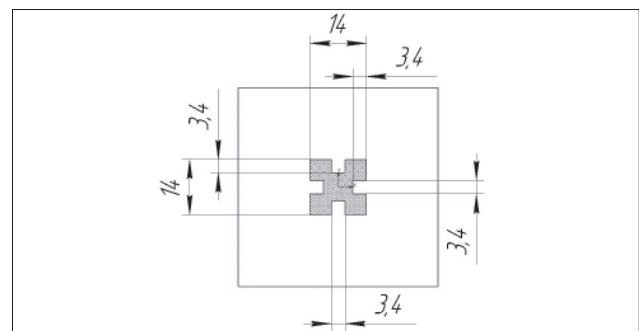


Рис. 6. Размеры обдуваемого участка *РЕМ*-мембраны

Fig. 6. Dimensions of the air-exposed area of the *РЕМ* membrane

Результаты измерений / Measurement results						
№	Напряжение источника питания, В	Сила тока источника питания, А	Расход водорода, л/ч	Напряжение на водородной ячейке, В	Потребляемая сила тока нагрузки, мА	Ток короткого замыкания, мА
1	6	1,7	$0,69 \cdot 10^{-3}$	0,34	13,9	30,8
2	7	1,88	$0,78 \cdot 10^{-3}$	0,348	14,3	35,3
3	8	2,03	$0,84 \cdot 10^{-3}$	0,354	14,8	39,8
4	9	2,26	$0,89 \cdot 10^{-3}$	0,377	15,2	43,2
5	10	2,43	$0,94 \cdot 10^{-3}$	0,46	16,8	50,1
6	11	2,6	$1 \cdot 10^{-3}$	0,58	17,5	55,4
7	12	2,75	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,6	18	58

Получили эффективную площадь обдуваемого участка $149,76 \text{ мм}^2$, которая может произвести $0,6 \text{ В}$ напряжения и 58 мА постоянного тока энергии на максимальном режиме. Стандартная аккумуляторная батарея для БВС с размером рамы 750 мм , применяемых для мониторинга сельскохозяйственных полей, имеет следующие характеристики: напряжение $25,2 \text{ В}$ и пиковая сила тока 40 А [8]. Для достижения требуемого напряжения необходимо последовательное соединение N_s элементов:

$$N_s = U_{ц}/U_{я}, \quad (1)$$

где $U_{ц}$ – целевое значение напряжения, В; $U_{я}$ – напряжение водородной топливной ячейки, В.

В итоге расчета по формуле (1) получили 42 последовательных соединения ячеек для выработки $25,2 \text{ В}$ рабочего напряжения. Для обеспечения рабочего тока 40 А при напряжении $0,6 \text{ В}$ плотность тока ячейки должна составлять $J = 0,89 \text{ А/см}^2$, что соответствует рабочему диапазону современных *РЕМ*-мембран. Исходя из этого необходимая эффективная площадь одной ячейки $S_{яч}$ составляет:

$$S_{яч} = I_{ц}/J, \quad (2)$$

где $I_{ц}$ – целевое значение силы тока, А; J – плотность тока ячейки, А/см^2 .

Необходимая площадь одной ячейки при расчете по формуле (2) составляет $44,94 \text{ см}^2$. Суммарная эффективная площадь *РЕМ*-мембран для сборки из 42 ячеек:

$$S_{\text{сум}} = N_s \cdot S_{яч}. \quad (3)$$

Получили требуемую эффективную площадь мембраны $0,19 \text{ м}^2$. Рассчитали необходимый расход водорода по следующей формуле:

$$Q_H = \frac{N_s \cdot (J \cdot S_{яч}) \cdot V_m \cdot 3600 \cdot \lambda}{z \cdot F}, \quad (4)$$

где V_m – молярный объем газа при идеальных условиях, л/моль; z – количество электронов, участвующих в реакции; λ – коэффициент стехиометрии (от 0,8 до 1,2); F – постоянная Фарадея, Кл/моль.

Подставив значения в формулу (4), получим:

$$Q_H = \frac{42 \cdot (0,89 \cdot 44,94) \cdot 22,41 \cdot 3600 \cdot 1}{2 \cdot 96485} = 702,3 \frac{\text{л}}{\text{ч}}.$$

В результате расчетов получили значения параметров водородного топливного элемента с учетом перевода в систему СИ для обеспечения питания бортовой сети БВС с размером рамы 750 мм : количество последовательно соединенных ячеек – 42 шт., площадь одной ячейки – $4,49 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, требуемый расход водорода – $1,95 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Выводы. Исходя из проведенных исследований разработали лабораторный стенд, который позволяет оценить работу водородного топливного элемента и его способность обеспечивать электроэнергией бортовую сеть БВС методом масштабирования показателей лабораторной *РЕМ*-мембраны. Для обеспечения функционирования БВС с размером рамы 750 мм достаточно суммарной площади мембраны $0,19 \text{ м}^2$, состоящей из 42 последовательно соединенных ячеек площадью $4,49 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Необходимый расход водорода для продувки топливного элемента и достижения показателей напряжения $25,2 \text{ В}$ и пиковой силы тока в 40 А составляет $1,95 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Библиографический список

1. 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.
2. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15. EDN: YLCOYB.
3. Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26. N1. С. 4-10. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-4-10. EDN: FWIYAM.
4. Gagliardi G.G., Palone O., Paris E., Borello D. An efficient composite membrane to improve the performance of PEM reversible fuel cells. *Fuel*. 2024. Vol. 357. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129993. EDN: OHGAXC.
5. Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S., et al. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. *Materials Today*. 2020. Vol. 32. 178-203. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.06.005. EDN: FQJRL.
6. Chen F., Ye H., Pei Ya. Optimizing the economic viability of proton exchange membrane fuel cells operated with oxygen-enriched cathode air for residential hydrogen energy storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 65. 236-251. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.280. EDN: BFUILZ.
7. Shadulla S., Satish Raj K., Naidu S.V. Experimental Studies on Performance of Single Cell PEM Fuel Cell with Various Operating Parameters. *Materials, Energy and Environment Engineering*. 2017. 227-235. DOI: 10.1007/978-981-10-2675-1_27.
8. Курбанов Р.К. Алгоритм расчета времени полета

беспилотного воздушного судна для проведения аэросъемки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N1. С. 35-40. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-35-40. EDN: LFJBYM.

References

1. Lobachevskiy 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.
2. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15. EDN: YLCOYB.
3. Izmaylov A.Y., Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production. *Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 26. N1. 4-10 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-4-10. EDN: FWIYAM.
4. Gagliardi G.G., Palone O., Paris E., Borello D. An efficient composite membrane to improve the performance of PEM reversible fuel cells. *Fuel*. 2024. Vol. 357. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129993. EDN: OHGAXC.
5. Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S., et al. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. *Materials Today*. 2020. Vol. 32. 178-203. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.06.005. EDN: FQJRL.
6. Chen F., Ye H., Pei Ya. Optimizing the economic viability of proton exchange membrane fuel cells operated with oxygen-enriched cathode air for residential hydrogen energy storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 65. 236-251. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.280. EDN: BFUILZ.
7. Shadulla S., Satish Raj K., Naidu S.V. Experimental Studies on Performance of Single Cell PEM Fuel Cell with Various Operating Parameters. *Materials, Energy and Environment Engineering*. 2017. 227-235. DOI: 10.1007/978-981-10-2675-1_27.
8. Kurbanov R.K. Algorithm for calculating the flight time of an unmanned aerial vehicle for aerial photography. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 35-40 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-35-40. EDN: LFJBYM.

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 equivalent contributions to the preparation of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 30.06.2026

Статья принята к публикации 15.09.2026

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



Способ гашения дуги с синхронизацией в предохранителе и дугогасительной камере КРУН 35 кВ

Роберт Султанович Ахметшин¹,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: zoia_2007@inbox.ru;

Тамара Борисовна Лещинская,

доктор технических наук, профессор;

Евгений Владимирович Попрядухин²,

магистрант

¹Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны, Российская Федерация;

²Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, г. Орел, Российская Федерация

Реферат. Основной элемент комплектных распределительных устройств – коммутационная аппаратура, служащая для коммутации и гашения дуги при переключениях и отключениях в случае коротких замыканий. Комплектные распределительные устройства наружной установки 35 кВ подстанций 35/0,4 кВ оснащаются предохранителями и выключателями нагрузки. Актуальным остается вопрос совершенствования защиты от коротких замыканий трансформаторов данных подстанций за счет реализации способа гашения дуги с синхронизацией в предохранителе и дугогасительной камере комплектного распределительного устройства 35 кВ. (Цель исследования) Повысить надежность и эффективность работы электрооборудования на примере предлагаемого варианта монтажа комплектного распределительного устройства напряжением 35–110 кВ; изучить вариант гашения (отключения) тока аварии путем синхронизации процессов в патронах кварцевых предохранителей напряжением 35 кВ и во внешних дугогасящих камерах. (Материалы и методы) Использовали сведения из литературных источников об имеющихся решениях по изготовлению и освоению отечественных и зарубежных комплектных распределительных устройств 35 кВ для трансформаторных подстанций 35/0,4 кВ. Применили общенаучные методы исследования, анализ существующих решений и синтез новых знаний в части совершенствования защиты в комплектных распределительных устройствах 35 кВ. (Результаты и обсуждение) Разработали способ гашения дуги с синхронизацией в предохранителе и дугогасительной камере комплектного распределительного устройства 35 кВ. Привели в предлагаемом техническом решении пример исполнения КРУН 35 кВ, в состав которого входит применение предохранителей для защиты силовых трансформаторов мощностью до 630 кВ·А. Предложили метод гашения дуги в дугогасительной камере и использование микропроцессорной релейной защиты для сокращения времени срабатывания размыкающего контакта. (Выводы) Представили решения по совершенствованию защиты от аварийных режимов и варианты комплектного распределительного устройства с их реализацией, которые способствуют развитию системы электроснабжения подстанций напряжением 35/0,4 кВ, и позволяют повысить надежность электроснабжения сельских потребителей. **Ключевые слова:** силовой трансформатор, электрический предохранитель, комплектное распределительное устройство наружной установки, комплектная трансформаторная подстанция, выключатель нагрузки, комплекты микропроцессорной защиты.

Для цитирования: Ахметшин Р.С., Лещинская Т.Б., Попрядухин Е.В. Способ гашения дуги с синхронизацией в предохранителе и дугогасительной камере КРУН 35 кВ // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 36–40. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-36-40. EDN: IZEPWL.

A Method of Extinguishing an Arc with Synchronization in a Fuse and an Arc Extinguishing Chamber of Complete Switchgear of 35 Kv

Robert S. Akhmetshin¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor, e-mail: zoia_2007@inbox.ru;

Tamara B. Leshchinskaya,

Dr.Sc.(Eng.) professor;

Evgeniy V. Popryadukhin²,

master's student

¹Naberezhnochelninsky Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation;

²Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Oryol, Russian Federation

Abstract. *The main element of complete switchgear is switching equipment, which serves for switching and extinguishing the arc during switching and disconnecting in the case of short circuits. Complete switchgears of the outdoor installation 35 kilovolts of substations 35/0.4 kilovolts are equipped with fuses and load switches. The issue of improving protection against short circuits of transformers of these substations by implementing a method of extinguishing the arc with synchronization in the fuse and arc-extinguishing chamber of a complete switchgear of 35 kilovolts remains relevant. (Research Purpose) The research purpose is increasing the reliability and efficiency of electrical equipment on the example of the proposed option of mounting a complete switchgear with a voltage of 35-110 kilovolts; studying the option of extinguishing the current of the accident by synchronizing processes in the cartridges of quartz fuses with a voltage of 35 kilovolts and in external arc-extinguishing chambers. (Materials and methods) We used information from literary sources about available solutions for the manufacture and development of domestic and foreign complete switchgear 35 kV for transformer substations 35/0.4 kV. We applied general scientific research methods, analysis of existing solutions and synthesis of new knowledge in terms of improving protections in complete switchgear 35 kilovolts. (Results and discussion) Developed a way to extinguishing the arc with synchronization in the fuse and arc chamber of the complete switchgear of 35 kilovolts. In the proposed technical solution, an example of complete switchgear 35 kilovolts was given, which includes the use of fuses to protect power transformers with a power of up to 630 kilovolt-amperes. A method of extinguishing the arc in the arc chamber and the use of microprocessor relay protection to reduce the time of operation of the opening contact was proposed. (Conclusions) We presented solutions to improve protection against emergency modes and options for a complete switchgear with their implementation, which contribute to the development of a power supply system for substations with a voltage of 35/0.4 kilovolts, and allow to increase the reliability of power supply to rural consumers.*

Keywords: power transformer, electric fuse, complete switchgear, complete transformer substation, load switch, microprocessor protection kits.

For citation: Akhmetshin R.S., Leshchinskaya T.B., Popryadukhin E.V. A method of extinguishing an arc with synchronization in a fuse and an arc extinguishing chamber of complete switchgear of 35 kV. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 36-40 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-36-40. EDN: IZEPWL.

В настоящее время начинает активно использоваться кабельная продукция с «сухой» пластиковой изоляцией из композитного материала на напряжение 35 кВ, так как в части законодательной базы запрещено строительство воз-

душных линий электропередачи в пределах генплана городов и жилой застройки населенных пунктов, поэтому распространение получают кабельные электрические сети. Внедряются компактное, неэнергоёмкое коммутационное оборудование,

трансформаторы напряжением 35/0,4 кВ, в соответствии с Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии (М.: Издательство «Эксмо». 2024. 32 с.).

С развитием электротехнической промышленности Российской Федерации кабельная продукция напряжением 35 кВ, силовые трансформаторы 35/0,4 кВ, а также компактное коммутационное оборудование с микропроцессорной релейной защитой и автоматикой набирают популярность. Становится очевидным распространение электрических сетей напряжением 35 кВ в соответствии с регламентами Правил устройства электроустановок (ПЭУ-7) (М.: Издательство «Эксмо». 2023. 464 с.).

Промышленность РФ серийно выпускает комплектующее оборудование и силовые трансформаторы напряжением 35/0,4 кВ мощностью до 630 кВА: это Тольяттинский завод, московский «Электроцит», курганские трансформаторные заводы, фирмы «СЭЩ» и CVEL. Перечисленные варианты создают предпосылки для применения напряжения 35 кВ в распределительных сетях. Это увеличивает показатели емкостного тока в электрических сетях 35 кВ вследствие режима работы сетей с изолированной нейтралью. Рост емкостного тока в сети приводит к увеличению времени процесса отключения тока аварии. Повышение надежности и энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования – актуальная задача [1, 2].

Цель исследования – повысить надежность и эффективность работы электрооборудования на примере предлагаемого варианта монтажа комплектного распределительного устройства напряжением 35-110 кВ; изучить вариант гашения (отключения) тока аварии путем синхронизации процессов в патронах кварцевых предохранителей напряжением 35 кВ и во внешних дугогасящих камерах.

Цель достигается решением следующих задач:

1. Размещением на пути тока аварии кварцевого предохранителя и размыкающего контакта силового контактора (дешунтирование металлических пластин искрогашения в дугогасительной камере).
2. Сокращением времени срабатывания размыкающего контакта путем использования микропроцессорной релейной защиты (во время протекания тока аварии через кварцевый предохранитель).

Материалы и методы. Попытки изготовления и освоения КРУН 35 кВ для трансформаторных подстанций предпринимались ранее (в 1980-1990 годах) в ближнем и дальнем зарубежье, а также были частично освоены как экспериментальные образцы в Прибалтике для сокращения электрических потерь

в системе и сетях, с компенсацией разницы удорожания стоимости оборудования и материалов [2].

Результаты и обсуждение. Основной элемент на подстанциях 35 кВ – коммутационная аппаратура. Промышленность выпускала предохранители «стреляющего» типа марки ПСН-35, ранее освоенные Мытищинским электромеханическим заводом и Нижнетуриным электроаппаратным заводом. В предохранителе ПСН-35 в патроне корпуса размещена плавкая вставка, находящаяся под предварительным линейным механическим напряжением. При протекании тока нагрузки или аварийного тока выше регламентного, плавкая вставка обрывается, и образуется растягивающаяся электрическая дуга, которая гаснет за счет заполнения внутренней полости корпуса патрона негорючими газами и высокой температуры. На напряжении 35 кВ для защиты силовых трансформаторов выпускаются предохранители серии ПКТ-35, в корпусе патрона которых располагается плавкая вставка, засыпанная кварцевым песком. Оба варианта предохранителей предназначены для напряжения 35/0,4 кВ и использования в цепях силовых трансформаторов, применяемых для нужд электроснабжения населенных пунктов сельского хозяйства, мощностью до 630 кВА.

В данной работе представлены варианты технических решений использования комплектного распределительного пункта наружной установки (КРПН) напряжением 35 кВ на базе сэндвич-панелей. Перечень оборудования КРПН 35 кВ:

- шкафы отходящих кабельных линий с предохранителем и выключателем нагрузки напряжением 35 кВ. В шкафу в нижнем отсеке расположены измерительные трансформаторы тока напряжением 35 кВ;
- силовой трансформатор до 630 кВА напряжением 35/0,4 кВ;
- шкаф измерительного трансформатора напряжением 35 кВ;
- шкаф вакуумного выключателя ввода распределительного устройства напряжением 35 кВ;
- шкаф двухфазного трансформатора напряжением 35/0,23 кВ с незаземленной нейтралью для образования оперативного напряжения для комплектов микропроцессорной техники;
- шкаф измерительного трансформатора напряжением 35 кВ для подключения катушки Петерсона (ДГК);
- шкаф размещения катушки Петерсона (ДГК);
- шкаф конденсаторных батарей компенсатора реактивной мощности в сети напряжением 0,4 кВ.

Указанный вариант комплекта оборудования первой секции КРПН 35 кВ для одной трансформа-

торной подстанции (ПС) после детальных конструкторских разработок и серийного выпуска электро-технического оборудования послужит толчком для развития и распространения сетей 35 кВ взамен более низких классов напряжения. Преимущество этого комплектного оборудования будет реализовываться за счет сокращения электрических потерь, внедрения компактных компенсирующих устройств, оптимального использования земельных угодий в зонах жилой застройки и сокращения сроков ввода производственных мощностей. Фактические размеры ячейки КРУН-35 определяются техническим регламентом на комплектующие изделия заводом-изготовителем электротехнического оборудования. Демонстрационная схема технического решения приведена на рисунке.

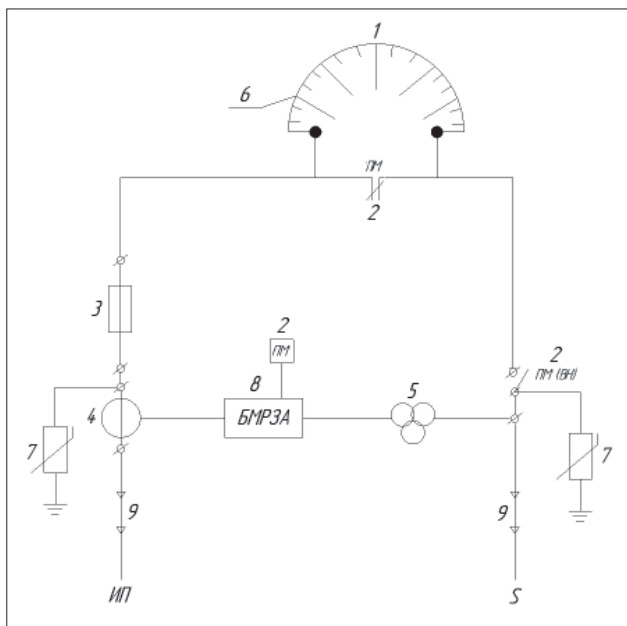


Рис. Схема технического решения КРУН 35 кВ
Fig. The scheme of the technical solution of the complete switchgear of 35 kV

Данная схема включает в себя следующую комплектацию оборудования:

1. ДГ – дугогаситель 35 кВ.
2. ПМ – высоковольтный контактор.
3. ПР – предохранитель 35 кВ.
4. ТА – измерительный трансформатор тока 35 кВ.
5. ТВ – измерительный трансформатор напряжения 35 кВ.
6. Искрогасящие пластины высокоомного сплава металла.
7. ОПН – ограничитель перенапряжения 35 кВ.
8. БМРЗА – блок микропроцессорной релейной защиты и автоматики.
9. КЛ – концевая муфта кабельной линии 35 кВ.

В представленном техническом решении КРУН 35 кВ предлагается использование предохранителей для защиты силовых трансформаторов мощностью до 630 кВА (патент RU № 2828099 С2. Комплектное распределительное устройство напряжением 35 кВ предохранителя (КРУН 35) трансформатора до 630 кВА / Ахметшин Р.С., Ахметшин М.Р.; заявл. № 2023107671 от 28.03.2023. Оpubл. 07.10.2024. EDN: BPQNYR). Для локализации и гашения дуги в предохранителе 35 кВ при перегорании плавкой вставки предлагается следующее техническое решение: в корпусе патрона из изоляционного материала для защиты силового трансформатора используется плавкая вставка. В процессе гашения дуги в корпусе патрона плавкая вставка перегорает, одновременно предусматривается работа искрогасителей, расположенных в дугогасительной камере. При значительных токах короткого замыкания и ограниченной теплоотдаче патрона возможно его разрушение. Предотвратить распространение аварии может дугогасительная камера 35 кВ, содержащая искрогасящие пластины из сплава с высоким омическим сопротивлением. Пластины дробят дугу на мелкие дуги, увеличивая теплоотдачу, тем самым способствуя гашению тока аварии. Дробление дуги в искрогасителях на мелкие части происходит за счет дешунтирования контакта в дугогасительной камере высоковольтного контактора (выключателя нагрузки), который состоит из искрогасящих металлических пластин из сплава с высоким омическим сопротивлением. При этом применяется серийный предохранитель «стреляющего» типа ПСН-35 или кварцenaполненный ПКТ-35. Синхронизирующая команда на одновременное срабатывание (дешунтирование) контактора поступает от предусмотренного блока микропроцессорной релейной защиты. Синхронизация процесса гашения дуги в предохранителе и дешунтирования искрогасящих пластин нормально закрытого контакта в высоковольтном контакторе (выключателе нагрузки) осуществляется за счет импульса дополнительно предусмотренной релейной защиты (блока микропроцессорной релейной защиты и автоматики) [3]. Информация в БМРЗА поступает от предусмотренных измерительных трансформаторов тока и напряжения. Возникновение перенапряжения в питающей кабельной сети при переходном процессе гасится предусмотренными ограничителями перенапряжения и надежной системой заземления металлоконструкций [4].

Выводы. Предложенный вариант КРУН-35 способствует развитию системы электроснабжения подстанций напряжением 35/0,4 кВ, что повышает

надежность и эффективность электрических сетей, а также помогает уменьшить потери электроэнергии.

Библиографический список

1. Варганова А.В., Ирихов А.С. Оценка надежности внешнего электроснабжения сетей 6-10 кВ с источниками распределенной генерации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. N3(52). С. 22-28. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-22-28. EDN: SFDZXB.
2. Овсянников М.Ю. Современные распределительные сети 6-10 кВ // *Вестник науки и образования*. 2020. N11-1(89). С. 44-47. DOI: 10.24411/2312-8089-2020-11105. EDN: LRMIOG.
3. Виноградов А.В., Моренко К.С. Структура системы сбора, хранения и обработки данных для управления конфигурацией электрической сети // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. N3(60). С. 38-45. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-38-45. EDN: JJMVPC.
4. Сайфутдинов З.Г., Ахметшин Р.С., Хафизов А.А. и др. Разработка автоматизированного распределительного устройства 6-10 кВ // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2024. N3. С. 168-171. EDN: HZCOXI.

References

1. Varganova A.V., Irikhov A.S. Evaluation of external power supply reliability in 6-10 kV grids with distributed generation. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021. N3(52). 22-28 (In Russian). DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-22-28. EDN: SFDZXB.
2. Ovsyannikov M.Y. Modern distribution grids 6-10 kV. *Bulletin of Science and Education*. 2020. N11-1(89). 44-47 (In Russian). DOI: 10.24411/2312-8089-2020-11105. EDN: LRMIOG.
3. Vinogradov A.V., Morenko K.S. Database structure for managing the configuration of a conceptual electrical grid. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2025. Vol. 72. N3(60). 38-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-38-45. EDN: JJMVPC.
4. Saifutdinov Z.G., Akhmetshin R.S., Khafizov A.A., et al. Development of automated switch device 6-10 kV. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2024. N3. 168-171 (In Russian). EDN: HZCOXI.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ахметшин Р.С. – сбор и анализ литературных данных по теме исследования, формулирование основных целей и задач исследования, подготовка материалов, формулирование общих выводов;

Лещинская Т.Б. – критический анализ и доработка текста, участие в разработке структуры системы сбора, хранения и обработки данных;

Попрядухин Е.В. – анализ материалов и методов, анализ полученных результатов, подготовка текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Akhmetshin R.S. – scientific guidance, critical analysis and revision of the text, participation in the development of the structure of the data collection, storage and processing system;

Leshchinskaya T.B. – scientific guidance, critical analysis and revision of the text, participation in the development of the structure of the data collection, storage and processing system;

Popryadukhin E.V. – preparation and analysis of materials and methods, participation in the development of the structure of the data collection, storage and processing system, development of the internal structure of the system blocks, analysis of the results, preparation of the text.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 30.06.2026

Статья принята к публикации 25.08.2026



Режимы работы комбинированной системы электрического теплоаккумуляционного обогрева животноводческих помещений

Алексей Викторович Хименко,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: avmkh87@gmail.com;

Дмитрий Анатольевич Тихомиров,

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

Алексей Васильевич Кузьмичев,

научный сотрудник

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0004.

Реферат. При выборе способа тепло- и воздухораспределения животноводческих помещений необходимо обеспечить заданный воздушно-тепловой режим в рабочей зоне расположения животных. В качестве источника обогрева помещений телятника различного назначения возможно использовать электрические теплоаккумуляционные установки конвективного типа. (Цель исследования) Изучить эффективность системы теплообеспечения на базе комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя и потолочного вентилятора для обогрева животноводческого помещения. (Материалы и методы) Разработали общую методику проведения экспериментальных исследований теплового режима рассматриваемого помещения с характеристикой контролируемых параметров при его обогреве электрической системой на базе комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя совместно с потолочным вентилятором. (Результаты и обсуждение) Привели выражения для расчета теплофизических характеристик помещения при его обогреве комбинированным электрическим теплоаккумуляционным обогревателем совместно с потолочным вентилятором и выбор его мощности для обеспечения колебания температуры помещения в пределах ± 2 градуса Цельсия. (Выводы) Выявили эффективность дополнительного дневного заряда комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя в течение 2-4 часов после 6-8 часов работы в режиме отдачи теплоты. Показали, что это позволит уменьшить суммарное время работы встроенного калорифера блока дополнительного нагрева воздуха комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя в вечернее и ночное время как минимум на 20-30 процентов, а также обеспечит температуру теплоаккумулирующего сердечника комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя в конце режима заряда 600-650 градусов Цельсия для эффективного теплосъема с сердечника в режиме отдачи теплоты. Констатировали, что использование комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя совместно с потолочным вентилятором для нагрева воздуха при условии учета электроэнергии по тарифу, дифференцированному в течение суток, приводит к снижению текущих годовых затрат у потребителя на оплату электроэнергии до 25 процентов, а также обеспечивает выравнивание температуры воздуха по высоте помещения и позволяет повысить температуру воздуха в рабочей зоне обогреваемого помещения на 2-3 градуса Цельсия.

Ключевые слова: электрический теплоаккумулятор, электрообогрев, тепловой режим помещения, потолочный вентилятор, режимы работы.

Для цитирования: Хименко А.В., Тихомиров Д.А., Кузьмичев А.В. Режимы работы комбинированной системы электрического теплоаккумуляционного обогрева животноводческих помещений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 41-47. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-41-47. EDN: MBDCRF.

Operating Modes of a Combined Electric Thermal Storage Heating System in Livestock Premises

Aleksey V. Khimenko,

Ph.D.(Eng.), leading researcher, e-mail: avmkh87@gmail.com;

Dmitriy A. Tikhomirov,

Dr.Sc.(Eng.), Corresponding Member of RAS, chief researcher;

Aleksey V. Kuzmichev,

researcher

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The work was performed within the framework of the State Task of the Ministry of Education and Science of Russia for FSBSI FSAC VIM FGUN-2025-0004.

Abstract. When choosing the method of heat and air distribution of livestock premises, it is necessary to ensure the specified air-thermal regime in the working area of the animals. As a source of heating in the calf premises, it is possible to use electric heat storage units of convective type. (Research purpose) The research purpose is studying the efficiency of the heat supply system based on the combined electric heat storage heater and ceiling fan for heating the livestock room. (Materials and methods) We developed a general methodology for conducting experimental studies of the thermal regime of the room under consideration with the characteristics of the controlled parameters when it is heated by an electric system based on a combined electric heat storage heater together with a ceiling fan. (Results and discussion) Expressions were given for the calculation of the thermal physical characteristics of the room when it is heated by a combined electric heat storage heater together with a ceiling fan and the choice of its power to ensure the temperature fluctuations of the room in the range of ± 2 degrees Celsius. (Conclusions) The effectiveness of the additional daily charge of the combined electric heat storage heater for 2-4 hours after 6-8 hours of operation in the heat recovery mode was revealed. It was shown that this will reduce the total operating time of the built-in heater of the additional heating unit of the combined electric heat storage heater in the evening and night by at least 20-30 percent, and also provide the temperature of the heat storage core of the combined electric heat storage heater at the end of the charge mode of 600-650 degrees Celsius for effective heat removal from the core in the heat recovery mode. It was stated that the use of a combined electric heat-accumulation heater together with a ceiling fan for air heating, provided that electricity is taken into account at a tariff differentiated during the day, leads to a decrease in the current annual cost of electricity for the consumer up to 25 percent, and also ensures the leveling of air temperature in the height of the room and allows you to increase the temperature in the working area of the heated room by 2-3 degrees Celsius.

Keywords: electric thermal storage setup, electric heating, thermal regime for premises, animal, ceiling fan, operating modes.

For citation: Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. Operating modes of a combined electric thermal storage heating system in livestock premises. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 41-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-41-47. EDN: MBDCRF.

Содержание животных требует повышенного внимания к созданию оптимальных параметров микроклимата, особенно это касается температуры и влажности. При выборе способа тепло- и воздухораспределения необходимо обеспечить заданный воздушно-тепловой режим в рабочей зоне расположения животных.

Исследования показывают, что в качестве источников обогрева небольших помещений при групповом содержании телят (боксы, профилактории и секции для содержания животных), а также ветеринарных, бытовых и технологических помещений на фермах крупного рогатого скота (КРС) возможно использовать электронагревательные установки с

аккумуляцией теплоты конвективного типа [1-3]. Изучены тепловые процессы и характер изменения температуры в электрической водяной системе теплоаккумуляционного отопления на базе центрального электротеплоаккумуляционного обогревателя (ЦЭТО) при количественном и качественном регулировании температуры теплоносителя [4]. Предложена методика теплового расчета основных параметров системы электротеплоаккумуляционного отопления с ЦЭТО. На основании экспериментальных сведений рассчитано количество аккумулируемой теплоты ЦЭТО и теплоотдача в воздушных каналах различной геометрии [5]. Выполнен расчет тепловых характеристик электрического теплоаккумуляционного обогревателя (ЭТО) динамического типа в режимах заряда и отдачи теплоты на основе полученных теоретических и экспериментальных данных [6-8]. Предложена конструкция центральной воздушно-отопительной системы на базе твердотельного теплоаккумулирующего блока. Рассчитаны тепловые характеристики предложенной конструкции [9, 10].

Цель исследования – изучить эффективность системы теплообеспечения на базе комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя и потолочного вентилятора для обогрева животноводческого помещения.

Материалы и методы. Анализ графиков электрической нагрузки ферм КРС на 200-400 голов (Тихомиров Д.А. Энергосберегающие электрические системы и технические средства теплообеспечения технологических процессов в животноводстве: монография. Орел: Картуш. 2022. 276 с.; Растимешин С.А., Трунов С.С. Энергосберегающие системы и технические средства отопления и вентиляции животноводческих помещений. М.: Сам Полиграфист. 2016. 180 с.) позволяет сделать вывод о том, что в период с 22:00-23:00 до 5:00-6:00 ч наблюдается резкое снижение потребления электроэнергии на фермах КРС. Незначительные объемы потребляемой электроэнергии в указанный период суток расходуются только на нагрев воды для поения животных и на освещение. Таким образом, можно констатировать, что провал в графике электрической нагрузки ферм КРС совпадает с периодом действия тарифов на потребление электроэнергии, дифференцированных по зонам суток («ночная зона» со сниженным тарифом, действующим с 23:00 до 7:00). Этот факт служит экономическим и энергетическим стимулом для более широкого внедрения систем электрического теплоаккумуляционного обогрева на базе ЭТО на фермах КРС.

Разработали лабораторный стенд для исследования теплового режима животноводческого помеще-

ния при совместной работе комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя и потолочного вентилятора (рис. 1).

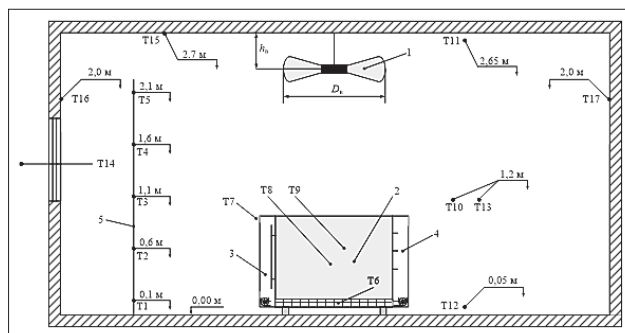


Рис. 1. Схема размещения датчиков температур в исследуемом помещении: 1 – потолочный вентилятор; 2 – комбинированный ЭТО (физическая модель); 3 – блок прямого нагрева ЭТО: электрокалорифер с тангенциальным вентилятором; 4 – блок подключения ТЭНов и забора воздуха с тангенциальным вентилятором комбинированного ЭТО; 5 – измерительная стойка

Fig. 1. Layout of temperature sensors placement in the test premises: 1 – ceiling fan; 2 – combined ETS unit (physical model); 3 – direct heating unit of combined ETS: electric heater with tangential fan; 4 – heating element connection unit and air intake unit with tangential fan of combined ETS; 5 – measuring rack

Предложили конструкцию комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя (КЭТО), который содержит два независимых нагревательных блока: теплоаккумуляционный блок и блок дополнительного нагрева воздуха (электрокалорифер).

Электрическая мощность комбинированного ЭТО $P_{\text{ЭТО}} = 2$ кВт и мощность блока дополнительного нагрева КЭТО $P_{\text{ДН}_\text{ЭТО}} = 1$ кВт. Мощность КЭТО подобрали в соответствии с данными и рекомендациями, приведенными в работах (Богословский В.Н., Сканава А.Н. Отопление: учебник для вузов. М.: Стройиздат. 1991. 735 с.) [6].

В процессе проведения экспериментальных исследований теплового режима помещения при его обогреве комбинированным ЭТО совместно с потолочным вентилятором произвели измерения температуры воздуха с помощью измерительной стойки 5 в пяти характерных точках (Т1-Т5) по высоте помещения на отметках от 0,1 до 2,1 м с шагом 0,5 м. Также измерили температуру поверхности ограждающих конструкций исследуемого помещения: поверхности потолка (Т15); поверхности наружной стены (Т16) и внутренней перегородки (Т17). Фик-

сировали температуру наружного воздуха (Т14). Также измерили температуру воздуха на выходе из КЭТО (Т6), температуру воздуха на выходе из блока дополнительного нагрева КЭТО (Т7) и температуру поверхности корпуса КЭТО (Т8) (рис. 1). С целью измерения температур применили датчики ТСМ 50М с пределом основной приведенной погрешности 0,25%.

Для управления режимом заряда КЭТО с помощью 2-канального измерителя-регулятора измерили температуру теплоаккумулирующего сердечника (Т9). Для управления режимом разряда КЭТО измерили температуру воздуха рабочей зоны на высоте 1,2 м (Т10). Поддерживали температуру в помещении 18°C. Также с помощью 2-канального измерителя-регулятора осуществили управление работой потолочного вентилятора путем измерения разности температур на отметке 0,05 и 2,65 м от пола (Т11 и Т12). Уставка для включения вентилятора (разность температур по высоте помещения) принята 2°C. Работа встроенного блока дополнительного нагрева КЭТО управляется одноканальным измерителем-регулятором при измерении температура воздуха в рабочей зоне на высоте 1,2 м (Т13). Электрокалорифер КЭТО включается при снижении температуры в исследуемом помещении ниже 17°C.

Результаты и обсуждение. Для поддержания требуемой температуры воздуха в исследуемом помещении при работе системы электрообогрева с КЭТО и потолочным вентилятором необходимым условием служит обеспечение максимального отклонения от среднесуточного значения температуры помещения Δt_n не более $\pm 2^\circ\text{C}$ (Богословский В.Н., Сканава А.Н. Отопление: учебник для вузов. М.: Стройиздат. 1991. 735 с.). Это обусловлено тем, что ЭТО – отопительный прибор с прерывистым (периодическим) тепловым потоком, который вызывает периодические изменения температуры помещения t_n , зависящие от теплотехнических свойств его ограждающих конструкций, величины и продолжительности тепlopоступлений. Температуру помещения t_n можно определить как среднее арифметическое между температурой воздуха в помещении t_b и радиационной температурой ограждающих конструкций t_R . Теплоотдача конвекцией и излучением от ЭТО в помещение неравномерна в течение суток, что объясняется режимом ее работы в период действия дифференцированного тарифа на потребление электроэнергии (режима заряда – 8 ч), в остальное время суток ЭТО работает в режиме отдачи теплоты. Температура воздуха в помещении t_b и радиационная температура ограждающих конструкций t_R несколько отличаются, их

изменения не совпадают во времени. Это вызвано тепловой инерцией ограждающих конструкций D , показателем теплопоглощения ограждающих конструкций P_R и показателем теплоусвоения помещения Y_n . Поэтому для обеспечения нормируемой температуры воздуха в помещении в течение суток при электрообогреве с помощью ЭТО с допустимым отклонением температуры $\pm 2^\circ\text{C}$ необходимо, чтобы мощность ЭТО $P_{\text{ЭТО}}$ была больше суммарных тепловых потерь помещения Q_n при заданной температуре на величину отношения T/m :

$$P_{\text{ЭТО}} = Q_n(T/m), \quad (1)$$

где T – период времени, в течение которого происходит отдача теплоты ЭТО (24 ч), ч; m – период режима заряда ЭТО (8 ч), ч.

При известной мощности ЭТО $Q_{\text{ЭТО}}$ и продолжительности режима заряда m тепловой поток от ЭТО можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\text{ЭТО}} = P_{\text{ЭТО}} \frac{m}{T} + P_{\text{ЭТО}} \Omega_{\text{ЭТО}}, \quad (2)$$

где $\Omega_{\text{ЭТО}}$ – коэффициент прерывистости теплового потока на поверхности ЭТО для каждого часа суток в зависимости от отношения m/T и затухания тепловой волны в ЭТО $\nu_{\text{ЭТО}}$ в течение суток (Богословский В.Н., Сканава А.Н. Отопление: учебник для вузов. М.: Стройиздат. 1991. 735 с.; Богословский В.Н. Строительная теплофизика: учебник для вузов. М.: Высш. Школа. 1982. 415 с.).

Величину затухания тепловой волны в ЭТО $\nu_{\text{ЭТО}}$ можно определить по формуле при условии, что теплоизоляционный и теплоаккумулирующий слой ЭТО имеет значение тепловой инерции $D < 2$:

$$\nu_{\text{ЭТО}} = R_{\text{ЭТО}}/R_{\text{из}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{ЭТО}}$ – суммарное значение сопротивления теплопередачи всех слоев ЭТО, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $R_{\text{из}}$ – значение сопротивления теплопередачи внешнего теплоизоляционного слоя ЭТО, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Показатель теплоусвоения помещения Y_n , $\text{Вт}/^\circ\text{C}$, определяется следующим образом:

$$Y_n = \sum S_i \cdot A_i, \quad (4)$$

где S_i – теплоусвоение отдельных ограждающих конструкций помещения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; A_i – площади ограждающих конструкций помещения, м^2 .

Показатель интенсивности теплообмена на всей внутренней площади ограждающих конструкций A_n , $\text{Вт}/^\circ\text{C}$, определили по формуле:

$$A_n = \alpha_{\text{ср}} \sum A_i, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{ср}}$ – осредненное по всем поверхностям в по-

мещении значение коэффициента конвективной теплоотдачи (для зимних условий в среднем около $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) (Богословский В.Н., Сканава А.Н. Отопление: учебник для вузов. М.: Стройиздат. 1991. 735 с.).

При прерывистом тепловом потоке от ЭТО коэффициент теплопоглощения P_R , $\text{Вт}/^\circ\text{C}$, внутренних ограждающих конструкций равен:

$$P_R = \frac{1}{\frac{\Omega_{\text{ЭТО}}}{Y_{\text{п}}} + \frac{1}{\Lambda_{\text{п}}}}. \quad (6)$$

Таким образом, зная значения показателя теплоустойчивости $Y_{\text{п}}/\Lambda_{\text{п}}$ и отношение $P_{\text{ЭТО}}/\Lambda_{\text{п}}$ возможно подобрать ЭТО, который обеспечит в помещении колебание температуры, не превышающее допустимое.

В связи с этим в ходе проведения экспериментальных исследований теплового режима помещения при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора выбрали температурный режим: КЭТО в режиме отдачи теплоты при работе встроенного вентилятора обеспечивает нагрев воздуха в помещении на уровне $18 \pm 0,5 ^\circ\text{C}$. При невозможности поддержания заданной температуры воздуха КЭТО и в случае снижения температуры ниже $17 ^\circ\text{C}$ (в пределах допустимого отклонения температуры $\pm 2 ^\circ\text{C}$) включается встроенный блок дополнительного нагрева КЭТО для догрева воздуха до заданного значения.

Также в ходе испытаний выявили, что положительный эффект на температурный режим в вечернее и ночное время оказывает дополнительная зарядка на 2-4 ч КЭТО после 6-8 ч работы в режиме отдачи теплоты. Дополнительная дневная зарядка позволяет уменьшить суммарное время работы встроенного калорифера ЭТО в вечернее и ночное время на 20-30% и обеспечить необходимую температуру теплоаккумулирующего сердечника КЭТО в конце режима заряда в диапазоне $600\text{--}650 ^\circ\text{C}$ для его эффективной работы в режиме отдачи теплоты. Для равномерного распределения температуры воздуха в помещении с разницей по высоте не более $2 ^\circ\text{C}$ (уставка $1,5 \pm 0,5 ^\circ\text{C}$) предусмотрена работа потолочного вентилятора совместно с КЭТО. При работе КЭТО совместно с потолочным вентилятором скорость движения воздуха в рабочей зоне помещения составляет не более $0,2\text{--}0,3 \text{ м/с}$, что соответствует нормативным значениям скорости движения воздуха в зоне нахождения животных согласно РД-АПК 1.10.01.01-18 «Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота». М.: Минсельхоз РФ. 2018. 167 с.

Изменение температуры воздуха в помещении в режиме автоматического поддержания температуры

воздуха помещения при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора показано на рисунке 2.

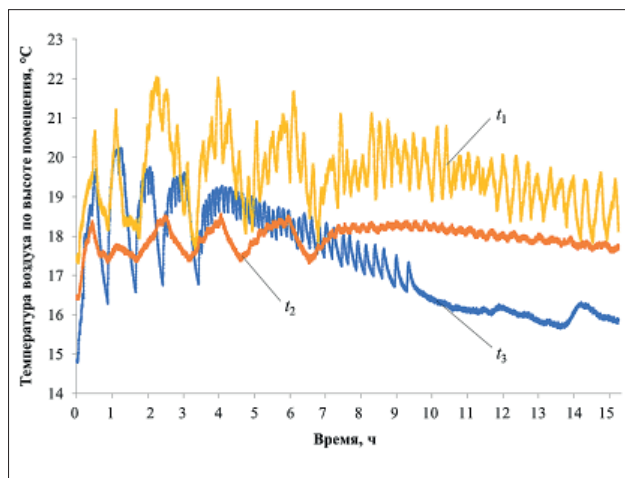


Рис. 2. График изменения температуры воздуха в помещении при автоматическом регулировании: t_1 – температура воздуха у потолка, $^\circ\text{C}$; t_2 – температура воздуха в рабочей зоне, $^\circ\text{C}$; t_3 – температура воздуха у пола, $^\circ\text{C}$
Fig. 2. Graph of air temperature variation in the room under automatic control: t_1 – air temperature near the ceiling, $^\circ\text{C}$; t_2 – air temperature in the working area, $^\circ\text{C}$; t_3 – air temperature near the floor, $^\circ\text{C}$

На основе полученных результатов экспериментальных исследований теплового режима представили характерные режимы работы элементов системы электрообогрева животноводческого помещения на базе КЭТО при его работе совместно с потолочным вентилятором (рис. 3).

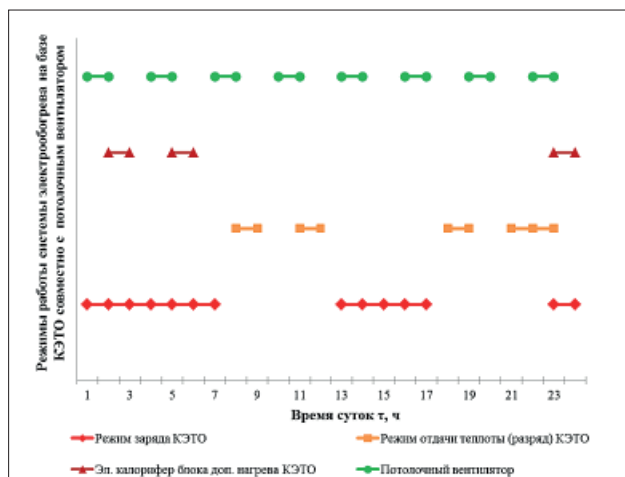


Рис. 3. Характерные режимы работы элементов электрической системы обогрева животноводческого помещения на базе КЭТО при совместной работе с потолочным вентилятором

Fig. 3. The typical operating mode for each element in a livestock premises electric heating system based on CETs, when used with a ceiling fan

Table	Таблица
Возможные режимы работы комбинированной системы электрообогрева на базе КЭТО и потолочного вентилятора Possible operating modes of a combined electric heating system based on ETSH and a ceiling fan	
Возможные режимы работы комбинированной системы электрообогрева	1. Режим заряда КЭТО совместно с работой потолочного вентилятора. 2. Режим отдачи теплоты КЭТО совместно с работой потолочного вентилятора. 3. Режим заряда совместно с работой электрокалорифера дополнительного нагрева и потолочного вентилятора. 4. Режим дозаряда в дневные часы на 2-4 ч после 6-8 ч работы КЭТО в режиме отдачи теплоты совместно с потолочным вентилятором. 5. Догрев воздуха до заданной температуры в режиме отдачи теплоты КЭТО встроенным электрокалорифером при невозможности поддержания заданной температуры воздуха КЭТО за счет теплоотдачи от теплоаккумулирующего сердечника совместно с потолочным вентилятором

В *таблице* приведены возможные режимы работы системы электрообогрева на базе КЭТО при совместной работе с потолочным вентилятором.

Выполнили предварительный технико-экономический расчет обеспечения теплового режима на примере телятника на 50 голов молочнотоварной фермы 400 голов с учетом периодических теплопоступлений при его обогреве электрической системой на базе комбинированного ЭТО (КЭТО) совместно с потолочным вентилятором. Расчет затрат на потребление электроэнергии по тарифу, дифференцированному в течение суток, а также повышение температуры воздуха в рабочей зоне обогреваемого помещения на 2-3°С за счет работы потолочного вентилятора, показал снижение текущих годовых затрат у потребителя на оплату электроэнергии до 25%.

Выводы. Собрали лабораторный стенд для изучения теплового режима животноводческого помещения с учетом прерывистых теплопоступлений при его обогреве электрической системой на базе комбинированного ЭТО (КЭТО) совместно с потолочным вентилятором. Разработали общую методику проведения экспериментальных исследований теплового режима рассматриваемого помещения с характеристикой контролируемых параметров. Привели выражения для расчета теплофизических характеристик помещения при его обогреве КЭТО совместно с потолочным вентилятором и выбора его мощности для обеспечения колебания температуры помещения не более ±2°С.

На основании полученных результатов экспериментальных исследований дали характеристику возможных режимов работы элементов системы электрообогрева на базе КЭТО при совместной работе с потолочным вентилятором. Доказали эффективность дневного дозаряда КЭТО в течение 2-4 ч (в зависимости от мощности КЭТО). Это позволяет уменьшить суммарное время работы встроенного калорифера блока дополнительного нагрева воздуха КЭТО в вечернее и ночное время на 20-30%, а также

обеспечить необходимую температуру теплоаккумулирующего сердечника КЭТО в конце режима заряда в диапазоне 600-650°С для его эффективной работы в режиме отдачи теплоты.

Использование КЭТО для нагрева воздуха комбинированного типа при условии учета электроэнергии по тарифу, дифференцированному в течение суток, приводит к снижению текущих годовых затрат у потребителя на оплату электроэнергии до 25%.

Библиографический список

1. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Iss. 11. 1753. DOI: 10.3390/agriculture12111753. EDN: PZLVUI.
2. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Дудин С.Н. Теплоаккумуляционная электроустановка для нагрева воздуха // *Сельский механизатор*. 2019. N8. С. 31-33. EDN: YRDHZG.
3. Трунов С.С., Хименко А.В., Тихомиров Д.А. Электрическая теплоаккумуляционная отопительная установка для животноводческих помещений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N4(57). С. 73-81. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-4-73-81. EDN: BDEVPD.
4. Sun Y., Liu C., Sang M. et al. Establishment and evaluation of performance index system of electric heated solid thermal storage. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 21. Iss. 5. 1531-1547. DOI: 10.3233/JCM-215076. EDN: XTTLPD.
5. Zhao H., Yan N., Xing Z. et al. Thermal calculation and experimental investigation of electric heating and solid thermal storage system. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 20. 5241. DOI: 10.3390/en13205241. EDN: OEVEBD.
6. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. et al. Thermal characteristics and operation efficiency of solid-state electro thermal storage. *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. 219-231. DOI: 10.1016/j.egy.2021.07.129.

EDN: RRSUW.

7. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. Experimental studies of the thermal characteristics of electro-thermal storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 839. 052058. DOI: 10.1088/1755-1315/839/5/052058. EDN: KZRHIJ.
8. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Theoretical studies of the thermal state of heat storage elements of the electric thermal storage in the modes of charging and heat output. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 254. 07010. DOI: 10.1051/e3sconf/202125407010. EDN: HUKHXC.
9. Cisek P., Taler D. Numerical and experimental study of a solid matrix electric thermal storage unit dedicated to environmentally friendly residential heating system. *Energy Building*. 2016. Vol. 130. 747-760. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.069.
10. Cisek P., Taler D. Numerical analysis and performance assessment of the thermal energy storage unit aimed to be utilized in smart electric thermal storage (SETS). *Energy*. 2019. Vol. 173. 755-771. DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.096.
7. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. Experimental studies of the thermal characteristics of electro-thermal storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 839. 052058. DOI: 10.1088/1755-1315/839/5/052058. EDN: KZRHIJ.
8. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Theoretical studies of the thermal state of heat storage elements of the electric thermal storage in the modes of charging and heat output. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 254. 07010. DOI: 10.1051/e3sconf/202125407010. EDN: HUKHXC.
9. Cisek P., Taler D. Numerical and experimental study of a solid matrix electric thermal storage unit dedicated to environmentally friendly residential heating system. *Energy Building*. 2016. Vol. 130. 747-760. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.069.
10. Cisek P., Taler D. Numerical analysis and performance assessment of the thermal energy storage unit aimed to be utilized in smart electric thermal storage (SETS). *Energy*. 2019. Vol. 173. 755-771. DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.096.

References

1. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Iss. 11. 1753. DOI: 10.3390/agriculture12111753. EDN: PZLVUI.
2. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Dudin S.N. Heat storage installation for air heating. *Rural Machine Operator*. 2019. N8. 31-33 (In Russian). EDN: YRDHZG.
3. Trunov S.S., Khimenko A.V., Tikhomirov D.A. Electric heat storage heating plant for livestock premises. *Electrical Engineering and Equipment in Agriculture*. 2024. Vol. 71. N4(57). 73-81 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-4-73-81. EDN: BDEVPD.
4. Sun Y., Liu C., Sang M. et al. Establishment and evaluation of performance index system of electric heated solid thermal storage. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 21. Iss. 5. 1531-1547. DOI: 10.3233/JCM-215076. EDN: XTTLPD.
5. Zhao H., Yan N., Xing Z. et al. Thermal calculation and experimental investigation of electric heating and solid thermal storage system. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 20. 5241. DOI: 10.3390/en13205241. EDN: OEVEBD.
6. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. et al. Thermal characteristics and operation efficiency of solid-state electro thermal storage. *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. 219-231. DOI: 10.1016/j.egy.2021.07.129. EDN: RRSUW.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Хименко А.В. – подготовка начального варианта статьи, формулирование цели и задачи исследования, разработка теоретических предпосылок;

Тихомиров Д.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;

Кузьмичев А.В. – доработка текста, формулирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Khimenko A.V. – preparation of the initial manuscript, formulation of the purpose and objectives of the study, development of theoretical prerequisites, literary analysis;

Tikhomirov D.A. – scientific guidance, formulation of the main directions of research;

Kuzmichev A.V. – revision of the manuscript, formation of general conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 30.06.2026

Статья принята к публикации 16.09.2026



Разработка алгоритмов функционирования лабораторного образца системы контроля параметров микроклимата

Игорь Мамедярович Довлатов,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: dovlatovim@mail.ru;

Илья Владимирович Комков,

аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: ilyakomkov10@yandex.ru;

Дмитрий Александрович Будников,

доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: dimm13@inbox.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0013

Реферат. Обеспечение стабильных параметров микроклимата в животноводческих комплексах – это фундаментальное условие сохранения физиологического гомеостаза, минимизации теплового стресса и максимизации молочной продуктивности крупного рогатого скота. Традиционные методы климат-контроля недостаточно оперативно реагируют на динамические изменения среды, требуя перехода к интеллектуальным адаптивным решениям. (Цель исследования) Разработать алгоритмы функционирования лабораторного образца автоматизированной системы контроля и регулирования параметров микроклимата животноводческих помещений для крупного рогатого скота. (Материалы и методы) Работа проводилась на базе специализированной лаборатории цифровых систем мониторинга ФНАЦ ВИМ с применением методов структурного моделирования, анализа нормативных документов и программной визуализации логики управления. (Результаты и обсуждение) В ходе исследования были спроектированы шесть последовательных режимов функционирования системы: экспресс-самодиагностики, циклического мониторинга датчиков, аналитической обработки данных, интеллектуального выбора исполнительных механизмов, их дифференцированного включения и критического реагирования. Интегрирована модернизированная модель расчёта температурно-влажностного индекса, дополненная коэффициентом влажности кормов, что позволило локализовать зоны теплового дискомфорта. Определены нормативные пороги срабатывания оборудования. Установлено, что предложенная алгоритмическая архитектура обеспечивает адаптивное управление микроклиматом. (Выводы) Разработанные алгоритмы обеспечивают многофакторную оптимизацию микроклимата, минимизируют ручной труд персонала и создают технологический фундамент для внедрения систем точного животноводства, гарантируя соответствие зооигиеническим стандартам.

Ключевые слова: молочное животноводство, микроклимат, алгоритмы функционирования, управление оборудованием, крупный рогатый скот, точное животноводство, животноводческие помещения.

Для цитирования: Довлатов И.М., Комков И.В., Будников Д.А. Разработка алгоритмов функционирования лабораторного образца системы контроля параметров микроклимата // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 48-55. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-48-55. EDN: ODPOOZ.

Scientific article

Development of Algorithms for the Functioning of a Laboratory Sample of a Microclimate Parameter Monitoring System

Igor M. Dovlatov,

Ph.D.(Eng.), senior researcher, e-mail: dovlatovim@mail.ru;

Ilya V. Komkov,
postgraduate, junior researcher, e-mail: ilyakomkov10@yandex.ru;
Dmitriy A. Budnikov,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, e-mail: dimm13@inbox.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The work was performed within the framework of the State Task of the Ministry of Education and Science of Russia for FSBSI FSAC VIM FGUN-2025-0013.

Abstract. Ensuring stable microclimate parameters in livestock complexes is a fundamental condition for maintaining physiological homeostasis, minimizing heat stress and maximizing the dairy productivity of cattle. Traditional methods of climate control do not respond quickly to dynamic changes in the environment, requiring a transition to intelligent adaptive solutions. (Research Purpose) The research purpose is developing algorithms for the functioning of a laboratory sample of an automated system for monitoring and managing the microclimate parameters of livestock premises for cattle. (Materials and methods) The work was carried out on the basis of a specialized laboratory of digital monitoring systems of FSAC VIM using methods of structural modeling, analysis of regulatory documents and software visualization of management logic. (Results and discussion) In the course of the study, six sequential modes of functioning of the system were designed: express self-diagnostics, cyclic monitoring of sensors, analytical data processing, intelligent selection of actuators, their differentiated work and critical response. Integrated modernized model of calculation of temperature and humidity index, supplemented by feed humidity coefficient, which allowed to localize zones of thermal discomfort. Regulatory thresholds for the operation of equipment are defined. It is established that the proposed algorithmic architecture provides adaptive control of the microclimate. (Conclusions) The developed algorithms provide multifactorial optimization of the microclimate, minimize manual labor of personnel and create a technological foundation for the implementation of precision animal husbandry systems, ensuring compliance with zoohygienic standards.

Keywords: dairy farming, microclimate, functioning algorithms, equipment management, cattle, precision animal husbandry, livestock facilities.

For citation: Dovlatov I.M., Komkov I.V., Budnikov D.A. Development of algorithms for the functioning of a laboratory sample of a microclimate parameter monitoring system. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 48-55 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-48-55. EDN: ODPOOZ.

Реализация продуктивного потенциала скота в молочном животноводстве является ключевым аспектом развития отрасли, заключающаяся в раскрытии его генетического ресурса. При этом обеспечение параметров микроклимата, соответствующих физиологическим потребностям животных, является необходимым условием для поддержания их жизнедеятельности [1, 2]. Поставленные задачи решаются на основе следующих нормативных документов: приказа Министерства сельского хозяйства РФ от 21.10.2020 № 622 «Об утверждении Ветеринарных правил содержания крупного рогатого скота в целях его воспроизводства, выращивания и реализации», Системы рекомендательных документов агропромышленного комплекса Министерства сельского хозяйства РФ, Методических рекомендаций по технологическо-

му проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота (РД-АПК 1.10.01.01-18).

Внешние экологические факторы детерминируют физиологический статус и продуктивность крупного рогатого скота, а гипертермия снижает продуктивные показатели, проявляясь слабостью, одышкой и гипергидрозом. Адаптационный потенциал вариабелен: экстремальные температурные флуктуации индуцируют патологические состояния, умеренные – физиологическую адаптацию. Согласно работам [2, 3], учитывая преобладание холодоустойчивости над термотолерантностью, профилактика теплового стресса требует комплексной оптимизации микроклимата, нормирования плотности размещения и рационализации технологий содержания.

Исследования *Heinicke J.* и *Mylostyvyi R.* свидетельствуют, что тепловой стресс модифицирует по-

веденческие паттерны КРС (снижение дневного потребления корма, сдвиг жвачной активности на ночное время, увеличение продолжительности стояния для усиления теплоотдачи) и повышает риск летальных исходов. Интегральную оценку воздействия микроклиматических факторов (температуры, влажности, инсоляции, скорости воздушного потока) осуществляют посредством температурно-влажностного индекса (ТНІ), при этом уровень удоя выступает ключевым индикатором термического комфорта животных [4, 5].

Многофакторность детерминации продуктивности крупного рогатого скота обуславливает необходимость комплексных исследований, при этом микроклимат помещений выступает в роли ключевого регулятора молочных показателей и экономической эффективности производства. Освещенность и спектральный состав света дифференцированно влияют на физиологический статус и продуктивные качества животных. Результаты исследований фоторецепторной стимуляции синтеза мелатонина демонстрируют вариабельность лактационных реакций, что актуализирует потребность в дальнейшей научной верификации механизмов светового воздействия [6-8].

В рамках проведения научных исследований целесообразно предусматривать энергоэффективность и экономическую рентабельность проектируемых технических решений, что обеспечивает практическую применимость и масштабирование разработанных устройств и систем в производственных условиях. Данный подход находит подтверждение в научных работах, в частности, у В.Т. Водяникова и других авторов, демонстрирующих экономическую целесообразность внедрения локальных систем энергообеспечения в технологии крупнотоварного животноводства [9-12].

Проблематичность реализации алгоритмов поддержания микроклимата с применением автоматизированных и автоматических систем управления обуславливается большим количеством внешних факторов, большим объемом помещений для содержания животных, инерционностью объекта управления, сложностью его точного описания и т.д. Большинство управляемых параметров являются взаимозависимыми, при этом уровень влияния внешних и управляющих воздействий на них значительно отличается. В результате требуется разработка и реализация многокритериальной модели управления. В настоящий момент требуется разработка алгоритмов различных этапов управления [13].

Таким образом, приоритетным направлением научных исследований является разработка комплекс-

ных систем мониторинга, регуляции и минимизации негативных последствий микроклимата, оказывающего существенное влияние на физиологический статус и продуктивные показатели крупного рогатого скота. Необходимо осуществлять разработку цифровых технологий для сельского хозяйства, обеспечивающих микроклимат в помещении для содержания скота [14].

Цель исследования – разработка алгоритмов функционирования лабораторного образца автоматизированной системы контроля и регулирования параметров микроклимата животноводческих помещений для крупного рогатого скота.

Материалы и методы. Исследование выполнялось на базе лаборатории цифровых систем мониторинга для животноводства в ФНАЦ ВИМ. Были использованы результаты анализа отчетов и научных исследований, а также опубликованных описаний к охраняемым документам, депонированных рукописей статей, обзоров, монографий и других материалов. Поиск исследований проводили по отечественным базам данных (*eLIBRARY, MDPI, Elsevier*), а также в *Google Scholar*. Разработка алгоритмов функционирования осуществлялась с помощью онлайн-приложения для построения диаграмм и схем – *Diagrams.net* (ранее *Draw.io*).

Результаты и обсуждение. В рамках алгоритма функционирования режима самодиагностики (*рис. 1*) реализуется процедура экспресс-контроля работоспособности системы. Осуществляется проверка электропитания, надежной связи с SCADA-системой,

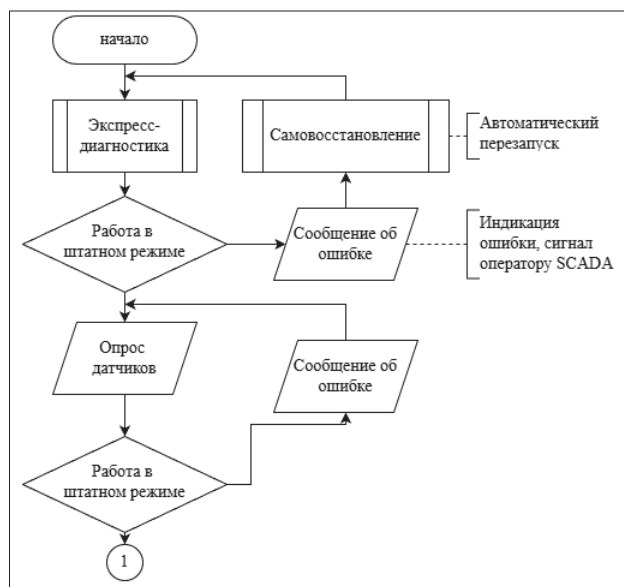


Рис. 1. Алгоритм самодиагностики системы контроля параметров микроклимата

Fig. 1. The algorithm of self-diagnosis of the microclimate parameter monitoring system

идентификации и опроса датчиков: температуры, относительной влажности воздуха, уровней углекислого газа, аммиака, диоксида серы, освещенности, скорости воздуха. При индикации ошибки датчика (датчиков) подается сигнал оператору SCADA, далее производится попытка повторной идентификации и самостоятельного устранения неисправности. Затем осуществляется проверка обрывов датчиков, соответствия уровней значений показаний. При успешном завершении верификации всех датчиков система переходит на этап мониторинга и управления. Для упрощения восприятия алгоритмы представлены в обобщенном виде.

В рамках алгоритма реализации мониторинга (рис. 2) реализуется циклический опрос датчиков: температуры, относительной влажности воздуха, уровней углекислого газа, аммиака, диоксида серы, освещенности, скорости воздуха с периодичностью, определяемой контроллером, реализующим алгоритм управления, и требуемой для получения актуальных значений контролируемых параметров. Полученные массивы текущих значений выводятся на мнемосхему SCADA-системы и записываются в централизованное хранилище информации, где осуществляется их структурированное сохранение с обязательной метамаркировкой, включающей уникальный идентификатор датчика, отражающий его пространственную привязку в помещении, а также временные метки даты и времени фиксации показаний.

В рамках обработки данных (рис. 3) реализуется запрос текущих значений и показаний датчиков (температуры, относительной влажности воздуха,

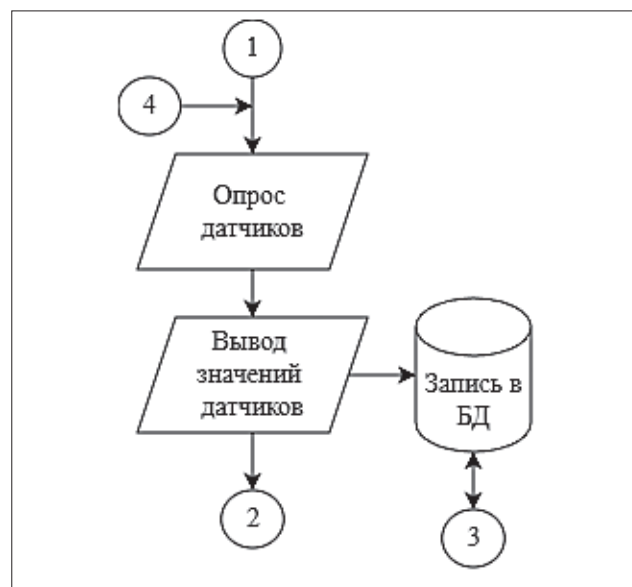


Рис. 2. Алгоритм мониторинга системы контроля параметров микроклимата

Fig. 2. The monitoring algorithm of the microclimate parameter control system

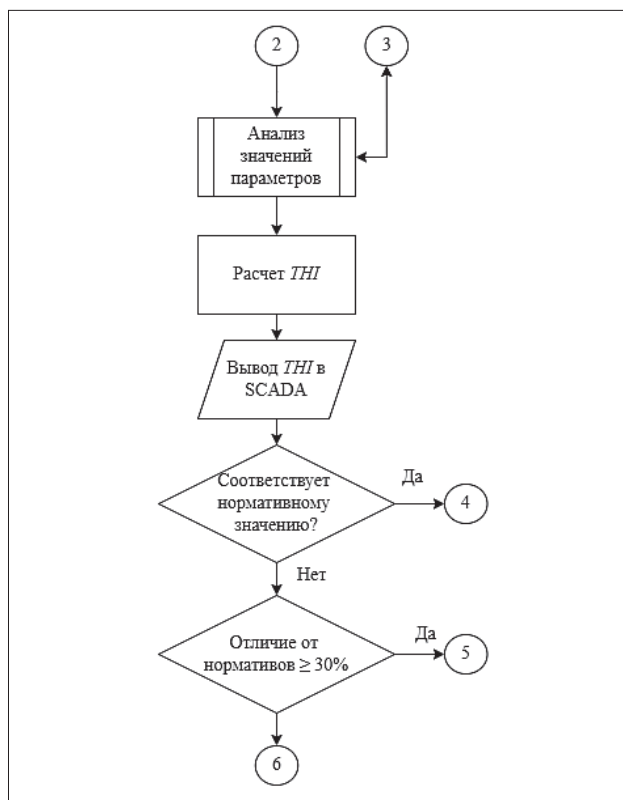


Рис. 3. Алгоритм обработки системы контроля параметров микроклимата

Fig. 3. The processing algorithm of the microclimate parameter control system

уровней углекислого газа, аммиака, диоксида серы, освещенности, скорости воздуха) из базы данных (БД), а также расчет отклонений от нормативных значений. На данном этапе осуществляется расчёт температурно-влажностного индекса по модернизированной формуле, после чего производится вывод текущих значений THI на мнемосхему SCADA-системы, привязанного к конкретному сенсорному узлу. Осуществляются проверки соответствия показаний датчиков нормативам и критичности отклонений: при соответствии установленным диапазонам система возвращается к опросу датчиков, а при отклонении на 30% и более инициируется переход в критический режим реагирования. При отклонении менее чем на 30% осуществляется переход на этап формирования управляющих воздействий.

Определение THI осуществляется на основе модернизированного уравнения [15]:

$$THI = 0,8 \cdot T_b + K \cdot RH \cdot (T_b - 14,4), \quad (1)$$

где T_b – температура окружающей среды, °C; RH – относительная влажность, выраженная в пропорции; K – поправочный коэффициент влияния влажности кормов в зависимости от вида корма (0,95 – молотое зерно);

1,00 – гранулированные комбикорма;
1,05 – сочные корма с высоким содержанием влажности).

В алгоритме принятия решений и активации исполнительных механизмов (рис. 4) реализуется непрерывная логика управления микроклиматом. На стадии принятия решений производится идентификация параметра, вышедшего за пределы нормативных порогов, после чего на основе характера отклонения осуществляется адресный выбор технического устройства и определяется вектор регулировки его мощности (повышения или снижения). Функциональная матрица соответствия контролируемых показателей и управляемых контуров предусматривает следующее распределение: температурный фон корректируется нагревательным оборудованием, осевыми/потолочными вентиляторами и гибкими ПВХ-воздуховодами; относительная влажность нормализуется вентиляторами и воздуховодами; концентрации CO_2 , NH_3 и SO_2 регулируются приточно-вытяжной вентиляцией; параметры скорости воздушного потока оптимизируются вентиляцией в комбинации с вентиляторами и воздуховодами; уровень освещённости изменяется посредством светильников. Сформированные управляющие команды подаются на исполнительные механизмы, которые запускаются на заданных мощности, скорости, ре-

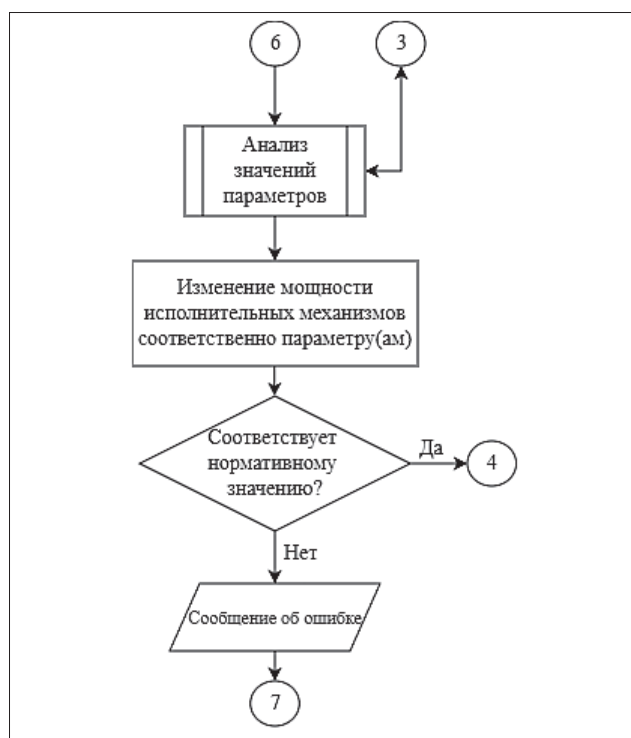


Рис. 4. Алгоритм принятия решений для исполнительных механизмов

Fig. 4. The decision-making algorithm for executive mechanisms

гламентированной продолжительности и т.д. По истечении установленного временного интервала производится верификация состояния среды: при возврате показателей к нормативным значениям система возвращается к режиму мониторинга, а в случае сохранения аномалий формируется уведомление для специалиста (с указанием идентификатора датчика, даты и времени фиксации) и инициируется переход в критический режим реагирования.

В алгоритме критического режима (рис. 5) осуществляется контроль отклонений параметров: при превышении нормативов на 30% и более (либо при сохранении дисбаланса после штатного цикла регулирования) система активирует критический протокол с формированием уведомления оператору (идентификатор датчика, дату, время). При отсутствии критического превышения проводится проверка возврата показателей к норме с последующим возвратом к пороговому контролю. После активации критического режима реализуется дифференцированное включение оборудования на максимальной мощности в зависимости от типа отклонения: температура корректируется нагревателями, вентиля-

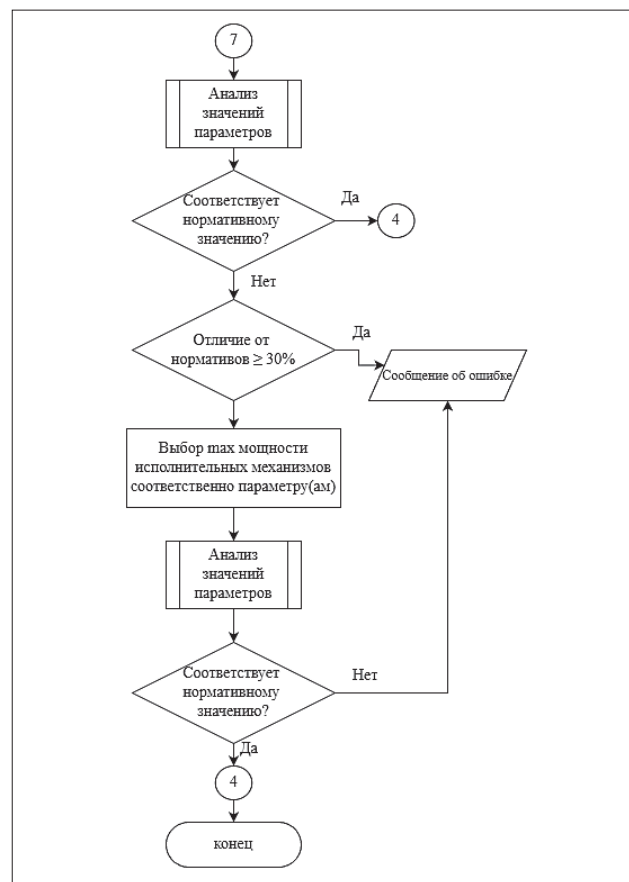


Рис. 5. Алгоритм критического режима системы контроля параметров микроклимата

Fig. 5. The algorithm of the critical mode of the microclimate parameter control system

торами и гибкими ПВХ-воздуховодами; влажность и скорость воздушного потока – вентиляторами и воздуховодами; концентрации CO_2 , NH_3 , SO_2 – приточно-вытяжной вентиляцией; освещённость – световыми приборами. По завершении цикла испытаний проводится повторный анализ параметров. При их нормализации система возвращается к режиму мониторинга; в случае сохранения аномалий – генерируется повторное уведомление с детализацией данных, после чего цикл коррекции повторяется до стабилизации микроклимата.

На следующем этапе исследований будет осуществлен подбор оборудования для реализации приведенных алгоритмов, их программная реализация и экспериментальная проверка.

Выводы.

В рамках данного исследования разработаны алгоритмы функционирования лабораторного образца автоматизированной системы контроля параметров микроклимата животноводческих помещений для крупного рогатого скота (самодиагностики, мониторинга, обработки, формирования управляющих сигналов, критического значения).

Интегрирована модернизированная формула расчёта температурно-влажностного индекса (THI) с введением поправочного коэффициента влияния влажности кормов ($K = 0,95-1,05$), позволяющая учитывать локальные зоны теплового стресса и повышать точность управления параметрами микроклимата.

Определены нормативные пороги срабатывания системы регулирования на основе конвертированных значений предельно допустимых концентраций газов (CO_2 , NH_3 , SO_2) и температурно-влажностных характеристик.

Библиографический список

1. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Том 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10. EDN: YFRZDV.
2. Tikhomirov D., Vasiliev A., Dudin S. Energy-saving electrical installations for heat supply of agricultural objects. Advanced Agro-engineering technologies for rural business development. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2019. 96-122. DOI: 10.4018/978-1-5225-7573-3.ch004. EDN: LBLZDD.
3. Довлатов И.М., Комков И.В. Математическое имитационное моделирование автоматизированной системы для снижения теплового стресса и схо-димость с теоретическими значениями // *Аграрная наука*. 2025. N1. С. 114-120. DOI: 10.32634/0869-8155-2025-390-01-114-120. EDN: CYTSOU.
4. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R. et al. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. N10(3). 2230. DOI: 10.31893/jabb.22030.
5. Heinicke J., Ott A., Ammon C. et al. Heat load-induced changes in lying behavior and lying cubicle occupancy of lactating dairy cows in a naturally ventilated barn. *Annals of Animal Science*. 2021. N21(4). 1543-1553. DOI: 10.2478/aoas-2020-0113.
6. Mylostyvyi R., Chernenko O. Correlations between environmental factors and milk production of holstein cows. 2019. N4(3). 103. DOI: 10.3390/data4030103.
7. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G. et al. Dairy cow behavior is affected by period, time of day and housing. *Animals*. 2022. N12(4). 512. DOI: 10.3390/ani12040512.
8. Yan G., Shi Z., Cui B. et al. Developing a new thermal comfort prediction model and web-based application for heat stress assessment in dairy cows. *Biosystems Engineering* 2022. N214. 72-89. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.12.006.
9. Barbara A. Murphy, Mary M. Herlihy, Margaret B. Nolan et al. Butler Identification of the blue light intensity administered to one eye required to suppress bovine plasma melatonin and investigation into effects on milk production in grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021. N104 (11). 12127-12138. DOI: 10.3168/jds.2021-20526.
10. Водяников В.Т. Совершенствование цен на оплату потребленных энергоресурсов в животноводстве // *Техника и технологии в животноводстве*. 2024. Том 14. N3. С. 59-65. DOI: 10.22314/27132064-2024-3-59. EDN: CICSJZ.
11. Довлатов И.М., Будников Д.А., Матвеев В.Ю. Инвестиционная привлекательность современных строительных технологий в агропромышленном комплексе: стоимостной анализ жизненного цикла животноводческих помещений // *Вестник НГИЭИ*. 2026. N3(178). С. 86-101. DOI: 10.24412/2227-9407-2026-3-86-101. EDN: KFBTYS.
12. Тихомиров Д.А. Показатели энергоэффективности сельхозпроизводства и перспективные направления их роста // *Техника и оборудование для села*. 2020. N5(275). С. 32-37. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-5-32-37. EDN: ISDCDT.
13. Тихомиров Д.А., Баклачян Р.А., Добровольский Ю.Н. Функциональная схема и исходные требования на комплект автоматического управления микроклиматом

- роклиматом в животноводческом помещении // *Агротехника и энергообеспечение*. 2021. N1(30). С. 7-17. EDN: MEKSSM.
14. Тарасенко Б.Ф., Букарев А.А., Хавьяримана Э. и др. Цифровые технологии и их влияние на механизацию сельского хозяйства // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Том 73. N1. С. 88-96. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-1-88-96. EDN: QUSAAE.
 15. Довлатов И.М., Комков И.В., Базаев С.О. и др. Влияние теплового стресса, определение температурно-влажностного индекса // *Аграрная наука*. 2024. N10. С. 171-176. DOI: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-171-176. EDN: IYWPBL.
- ### References
1. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural machinery and technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10. EDN: YFRZDV.
 2. Tikhomirov D. Energy-saving electrical installations for heat supply of agricultural objects. Advanced agro-engineering technologies for rural business development. Hershey, PA, USA: IGI Global. 2019. 96-122. DOI: 10.4018/978-1-5225-7573-3.ch004. EDN: LBLZDD.
 3. Dovlatov I.M., Komkov I.V. Mathematical simulation modeling of automated system to reduce heat stress and convergence to theoretical values. *Agrarian Science*. 2025. N1. 114-120 (Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2025-390-01-114-120. EDN: CYTSOU.
 4. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R. et al. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. N10(3). 2230. DOI: 10.31893/jabb.22030.
 5. Heinicke J., Ott A., Ammon C. et al. Heat load-induced changes in lying behavior and lying cubicle occupancy of lactating dairy cows in a naturally ventilated barn. *Annals of Animal Science*. 2021. N21(4). 1543-1553. DOI: 10.2478/aoas-2020-0113.
 6. Mylostyvyi R., Chernenko O. Correlations between environmental factors and milk production of holstein cows. 2019. N4(3). 103. DOI: 10.3390/data4030103.
 7. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G. Dairy cow behavior is affected by period, time of day and housing. *Animals*. 2022. N12(4) 512. DOI: 10.3390/ani12040512.
 8. Yan G., Shi Z., Cui B., Li H. Developing a new thermal comfort prediction model and web-based application for heat stress assessment in dairy cows. *Bio-systems Engineering*. 2022. 214. 72-89. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.12.006.
 9. Barbara A. Murphy, Mary M. Herlihy, Margaret B. Nolan. Butler Identification of the blue light intensity administered to one eye required to suppress bovine plasma melatonin and investigation into effects on milk production in grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021. N104(11). 12127-12138. DOI: 10.3168/jds.2021-20526.
 10. Vodyannikov V.T. Improvement of prices for payment of consumed energy resources in livestock. *Machinery and technologies in animal husbandry*. 2024. Vol. 14. N3. 59-65 (Russian). DOI: 10.22314/27132064-2024-3-59. EDN: CICSJZ.
 11. Dovlatov I.M., Budnikov D.A., Matveev V.Yu. Investment attractiveness of modern construction technologies in the agro-industrial complex: cost analysis of the life cycle of livestock premises. *Bulletin of the NGIEI*. 2026. N3(178). 86-101 (Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2026-3-86-101. EDN: KFBTYS.
 12. Tikhomirov D.A. Indicators of energy efficiency of agricultural production and perspective of their growth. *Technique and equipment for the village*. 2020. N5(275). 32-37 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-5-32-37. EDN: ISDCDT.
 13. Tikhomirov D.A., Baklachyan R.A., Dobrovolsky Yu.N. Functional diagram and initial requirements for the set of automatic climate control in a livestock room. *Agrotechnics and energy supply*. 2021. N1(30). 7-17 (In Russian). EDN: MEKSSM.
 14. Tarasenko B.F., Bukarev A.A., Havyarimana E. et al. Digital technologies and their impact on agricultural mechanization. *Electrical technologies and equipment in the agro-industrial complex*. 2026. Vol. 73. N1. 88-96 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-1-88-96. EDN: QUSAAE.
 15. Dovlatov I.M., Komkov I.V., Bazaev S.O. et al. Effect of heat stress, determination of temperature-humidity index. *Agrarian science*. 2024. N10. 171-176 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-171-176. EDN: IYWPBL.
- ### Конфликт интересов
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
- ### Conflict of interest
- The authors declare no conflict of interest.
- ### Заявленный вклад соавторов:
- Довлатов И.М. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;

Комков И.В. – подготовка начального варианта статьи, литературный анализ, разработка алгоритмов работы системы;

Будников Д.А. – доработка текста, формирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Dovlatov I.M. – scientific guidance, formulation of the main research directions;

Komkov I.V. – preparation of the initial manuscript, literary analysis, development of algorithms for the system;

Budnikov D.A. – revision of the text, writing general conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 29.06.2026

Статья принята к публикации 15.09.2026



Теплофизическая модель вымени коровы как объекта термографического контроля

Иван Иванович Гируцкий¹,

доктор технических наук, доцент, e-mail: gir_50@mail.ru;

Андрей Григорьевич Сеньков²,

кандидат технических наук, доцент;

Денис Дмитриевич Слимаков¹,

аспирант

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь;

²Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Реферат. Использование тепловизоров в технике и промышленности имеет многолетнюю историю. В последние годы проведены многочисленные исследования по применению термографии как неинвазивного метода диагностики воспалительных патологий у сельскохозяйственных животных. Измерение температуры в ветеринарии – важная технико-технологическая задача, которую необходимо решать, обязательно принимая во внимание биологические особенности сельскохозяйственных животных и области практической диагностики заболеваний, для которых должны проводиться такие измерения. Особое значение имеют вопросы диагностики мастита коров в условиях поточного производства молока. На результат анализа термографического снимка вымени с наличием и без воспалительной патологии влияют различного рода возмущения (помехи). (Цель исследования) Провести анализ и обобщение моделей теплообмена для биотехнических систем и синтезировать рациональную методику оценки изменения термодинамической температуры поверхности кожи вымени в зависимости от температурно-влажностных параметров производственного помещения с тепловизионной установкой. (Материалы и методы) Рассмотрели составляющие уравнения теплообмена основного ядра вымени через кожу с окружающей средой с возможностью количественной оценки вклада различных составляющих теплообмена на изменение термодинамической температуры поверхности кожи вымени коровы. (Результаты и обсуждение) Синтезировали в связи с отсутствием результатов экспериментальных исследований теплообмена вымени коровы в условиях производственного помещения, например, доильного зала, уравнение теплового баланса для вымени коровы путем обобщения существующих исследований, включая исследования по теплообмену человеческого организма. (Выводы) Получили зависимости и количественные оценки флуктуаций термодинамической температуры поверхности кожи вымени для учета в алгоритмах диагностики воспалительных заболеваний (мастита) на базе термографического метода. Определили, что параметры модели необходимо уточнять путем накопления и статистической обработки данных для условий конкретного молочнотоварного комплекса. **Ключевые слова:** теплообмен, вымя, корова, температура, термография.

Для цитирования: Гируцкий И.И., Сеньков А.Г., Слимаков Д.Д. Теплофизическая модель вымени коровы как объекта термографического контроля // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 56-64. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-56-64. EDN: OINHRI.

Scientific article

Thermophysical Model of the Cow's Udder as an Object of Thermographic Control

Ivan. I. Girutskiy¹,

Dr.Sc.(Eng.), associate professor, e-mail: gir_50@mail.ru;

Andrey G. Senkov²,
Ph.D.(Eng.), associate professor;
Denis D. Slimakov¹,
postgraduate

¹Belarussian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus;

²Radio Engineering Center of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. *The use of thermal imagers in engineering and industry has a long history. In recent years, numerous studies have been conducted on the use of thermography as a non-invasive method of diagnosing inflammatory pathologies in farm animals. Temperature measurement in veterinary medicine is an important technical and technological task that must be solved, taking into account the biological characteristics of farm animals and the areas of practical diagnosis of diseases for which such measurements should be carried out. Of particular importance are the issues of diagnosing mastitis of cows in the conditions of stream milk production. The result of the analysis of the thermographic image of the udder with and without inflammatory pathology is affected by various kinds of disturbances (interference). (Research purpose) The research purpose is conducting an analysis and generalization of heat exchange models for biotechnical systems and synthesis a rational methodology for assessing the change in thermodynamic temperature of the udder skin surface depending on the temperature and humidity parameters of the production room with a thermal imaging installation. (Materials and methods) The components of the heat exchange equations of the main udder core through the skin with the environment were considered with the possibility of quantifying the contribution of various components of heat exchange to the change in thermodynamic temperature of the skin surface of the cow udder. (Results and discussion) In connection with the lack of results of experimental studies of heat exchange of cow udders in a production room, for example, a milking hall, the thermal balance equation for cow udders was synthesized by generalizing existing studies, including studies on heat exchange of the human body. (Conclusions) Dependencies and quantitative estimates of fluctuations of the thermodynamic temperature of the udder skin surface were obtained for accounting in the algorithms for diagnosing inflammatory diseases (mastitis) on the basis of the thermographic method. It was determined that the parameters of the model should be clarified by accumulating and statistically processing data for the conditions of a particular dairy complex.*

Keywords: heat exchange, udder, cow, temperature, thermography.

For citation: Girutskiy I.I., Senkov A.G., Slimakov D.D. Thermophysical model of the cow's udder as an object of thermographic control. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. 73. N3. 56-64 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-56-64. EDN: OINHRI.

Контроль очаговых воспалений и тепловых стрессов в ветеринарии с использованием бесконтактной термографии – важная технологическая задача [1]. Особую актуальность при современном поточном производстве молока приобретает проблема диагностики мастита у коров, которую необходимо решать, обязательно принимая во внимание условия производства и биологические особенности сельскохозяйственных животных [2, 3].

Перспективность неинвазивных термографических методов в диагностике воспалительных заболеваний различных сельскохозяйственных животных подтверждают многочисленные исследования в разных странах мира [4, 5]. Но в реальных производственных условиях на результат измерения

температурного поля вымени коровы влияет ряд возмущающих факторов, идентификация которых требуется для повышения достоверности результатов термографических измерений. При этом, несмотря на то что корова относится к теплокровным животным, обеспечивающим терморегуляцию организма в рамках термонеutralной зоны, на результат измерений контролируемой поверхности вымени окажет влияние и теплообмен с окружающей средой. Поэтому следует получить оценку флуктуаций термодинамической температуры поверхности вымени коровы из-за изменений температурно-влажностных условий в помещениях для содержания животных.

Цель исследования – провести анализ и обобщение моделей теплообмена для биотехнических

систем и синтезировать рациональную методику оценки изменения термодинамической температуры поверхности кожи вымени в зависимости от температурно-влажностных параметров производственного помещения с тепловизионной установкой.

Материалы и методы. Теплообмен вымени коровы рассмотрели в рамках статической математической модели [6]. Представили вымя коровы в рамках нашей модели в виде серого объекта, внутреннее тело которого имеет постоянную температуру и защищено от внешнего мира слоем кожи (рис. 1). Поскольку при воспалительном заболевании вымени воспаленные участки имеют относительно небольшие размеры (рис. 2а), то в рамках модели для термографического анализа кожный покров вымени коровы исследовали в виде полубесконечной плоскопараллельной среды (рис. 2б) [7, 8].

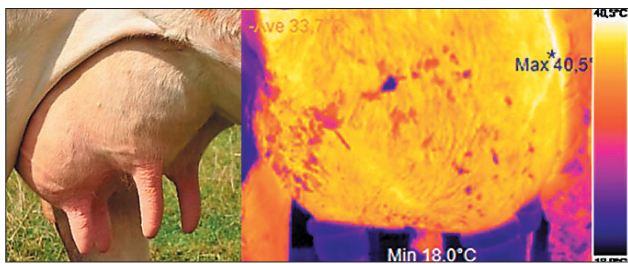


Рис. 1. Пример фото- и термографического снимка вымени коровы

Fig. 1. An example of a photographic and thermographic image of a cow's udder

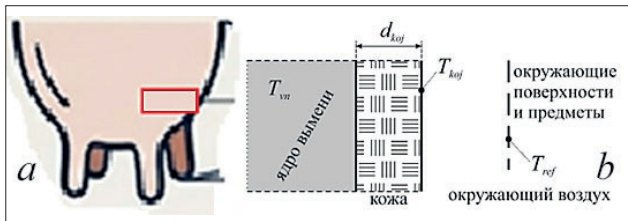


Рис. 2. Пример расположения и размеров воспаленного участка вымени коровы (а); структура слоев в модели теплопередачи через кожный покров вымени (б): T_{vn} – внутренняя термодинамическая температура ядра вымени, К; T_{koj} – термодинамическая температура поверхности кожи вымени, К; d_{koj} – толщина кожи вымени коровы; T_{ref} – температура в помещении

Fig. 2. An example of the location and size of the inflamed area of the cow's udder (a); layer structure in the model of heat transfer through the skin of the udder (b): T_{vn} – internal thermodynamic temperature of the udder core, К; T_{koj} – thermodynamic temperature of the udder skin surface, К; d_{koj} – thickness of the cow's udder skin; T_{ref} – room temperature

При изучении теплообмена биологического объекта с внешней средой используются известные за-

коны теплотехники [9, 10]. То есть можно считать, что передача теплоты от внутренних органов (ядра вымени) к поверхности тела (кожа вымени) и последующая отдача ее в окружающую среду происходят только по законам теплопередачи. Из-за сложности проведения активного эксперимента по теплообмену с животными применяются и биотермические модели, полученные на примере исследований человеческого организма [6, 10].

Термодинамическая температура поверхности вымени коровы может изменяться при изменении условий теплообмена с окружающей средой. Основным путем передачи тепла от внутренних органов к вымени коровы служит тепломассоперенос кровью. У крупного рогатого скота температура различных частей тела составляет 37,5–39,5 °С. Эти колебания зависят от температуры окружающей среды, вида животных, возраста, индивидуальных особенностей, времени суток и других факторов. Между организмом животного и воздушной средой существует постоянная связь. Обеспечение постоянства температуры тела при изменении наружной температуры основывается на способности организма животного поддерживать равновесие между образованием тепла (химическая терморегуляция) и его отдачей (передачей) во внешнюю среду (физическая терморегуляция).

Для поддержания необходимой температуры тела вымени коровы должно быть равновесие между образовавшейся теплотой в организме и поступившей извне, с одной стороны, и рассеиваемой теплотой в окружающую среду через поверхность вымени – с другой стороны.

Основные пути отдачи тепла организмом животных – теплоизлучение (радиация), конвекция (срыв тепла), испарение и кондукция [4, 6].

При этом через поверхностные слои вымени коровы (кожа) проходит один и тот же поток мощности:

$$E_t = E_{izl} + E_k + E_{isp} + E_{kon} + E_d, \quad (1)$$

где E_t – поток тепловой мощности, генерируемой организмом коровы и поступающей от внутреннего тела вымени через кожу на поверхность, Вт/м²; E_{izl} – разность радиационных потоков мощностей, излучаемой и поглощаемой поверхностью вымени, Вт/м²; E_k – поток мощности, теряемой поверхностью вымени за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, Вт/м²; E_{isp} – поток мощности, расходуемой на испарение влаги с поверхности вымени коровы, Вт/м²; E_{kon} – поток тепловой мощности, передающийся внешней среде путем кондукции, Вт/м²; E_d – теплообмен за счет диффузии паров воды через кожу вымени, Вт/м².

В рамках рассматриваемой модели теплопереноса использовали известное уравнение передачи тепла через теплопроводящую стену, когда защитную функцию выполняет кожа вымени:

$$E_t = (1/R_{\text{koj}}) \cdot (T_{\text{vn}} - T_{\text{koj}}), \quad (2)$$

где R_{koj} – термическое сопротивление кожи вымени коровы, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; T_{vn} – внутренняя термодинамическая температура вымени, К; T_{koj} – термодинамическая температура поверхности кожи вымени, К.

Термическое сопротивление кожи вымени коровы определяется формулой:

$$R_{\text{koj}} = d_{\text{koj}}/k_{\text{koj}}, \quad (3)$$

где d_{koj} – толщина кожи вымени коровы, м; k_{koj} – коэффициент теплопроводности кожи вымени коровы, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Результаты численных расчетов по модели (1)(3) зависят от характеристик производственного помещения, где будет осуществляться термографическая диагностика вымени коровы. В соответствии с решением различных технологических задач для этого могут быть использованы различные конструктивно-технологические схемы установки тепловизионного модуля [3, 7].

Рассмотрели вариант установки тепловизионного модуля в технологическом потоке доильного зала, которая реализует поштучный проход коров через зону термографического контроля (рис. 3).

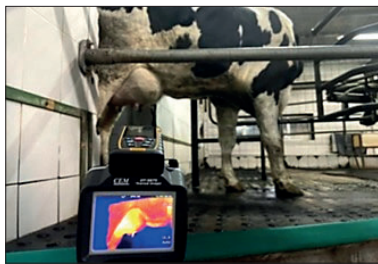


Рис. 3. Размещение тепловизионного устройства на входе в доильный зал [7]

Fig. 3. Placement of a thermal imaging device at the entrance to the milking hall [7]

Выполнили анализ модели с учетом нормативных параметров микроклимата для доильных залов.

При движении коровы вымя соприкасается только с воздухом, поэтому теплопередача кондукцией через воздух составляет незначительную величину, так как коэффициент теплопроводности неподвижного воздуха равен $9,65 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Теплоотдача радиацией – это передача тепла в форме лучистой энергии с поверхности тела на окружающие поверхности, имеющие более низкую

температуру, или в окружающее пространство. Количество тепла, отдаваемого излучением, зависит от температуры поверхности тела, температуры окружающих тело стен и поверхностей, их способности излучать тепло, величины площади тела и окружающих поверхностей, расстояния и взаимного расположения тела и окружающих его поверхностей. Причем интересующую нас для использования при термографической диагностике мастита у коров область инфракрасного излучения на основании закона Вина определяют длины волн максимума излучения $\lambda_{\text{max}} = 9,4\text{--}9,1 \text{ мкм}$. А кожа вымени коровы, содержащей не менее 80% воды, поглощает инфракрасные лучи с характеристиками, близкими к абсолютно черному телу [8, 9].

Разность радиационных энергий излучаемой и поглощаемой поверхностью вымени определяется известным законом Стефана – Больцмана. В нашем случае выражение для разности радиационных энергий с весьма ограниченными диапазонами изменения термодинамических температур вымени и помещения:

$$T_{\text{koj}} \cong 310 \text{ К}, \text{ а } T_{\text{ref}} \cong (293 \pm 5) \text{ К}.$$

Принимая значение коэффициента излучения для кожи вымени равным $\varepsilon \cong 0,98$, после несложных преобразований, пренебрегая величинами 2-го порядка малости, разность радиационных энергий излучаемой и поглощаемой поверхностью вымени можно представить в виде:

$$E_{\text{izl}} \cong 6,0(T_{\text{koj}} - T_{\text{ref}}). \quad (4)$$

В общем балансе тепловых потерь теплопередача конвекцией составляет значительную долю (свыше 25-30%). Для оценки энергии, теряемой поверхностью вымени за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, однозначных рекомендаций нет [10].

Исходя из предположения о близости нашего случая к теплообмену человека, воспользовались возможностью привязки результатов, полученных в ходе исследований по теплообмену организма человека. Для расчетов теплоотдачи конвекцией можно использовать уравнение Н.К. Витте, основанное на учете охлаждения кататермометра и установленных при этом эмпирических постоянных величин:

$$E_k = 7,0(0,5 + \sqrt{v})(T_{\text{koj}} - T_{\text{ref}}) \quad (5)$$

для $v \leq 0,6 \text{ м/с}$;

$$E_k = 8,4(0,273 + \sqrt{v})(T_{\text{koj}} - T_{\text{ref}}) \quad (6)$$

для $v > 0,6 \text{ м/с}$.

В нашей модели для оценки конвективного теплообмена использовали зависимость (5), так как она дает максимальный вклад в изменение температуры поверхности вымени коровы. Авторы и намерены оценить максимально возможные оценки возмущающих факторов на результат термографической диагностики. Эти зависимости позволяют учесть и скорость движения воздуха, что необходимо.

Предлагается пренебречь теплообменом за счет испарения, авторы настоящего исследования учли эту составляющую в методике [11]. Количество тепла, отдаваемого с поверхности тела испарением, определяется уравнением:

$$E_{\text{isp}} = \beta_{\text{vn}} W (P_{\text{koj}} - P_{\text{ref}}), \quad (7)$$

где β_{vn} – коэффициент перехода тепла во внешнюю среду при испарении пота, Вт·м⁻²/Па, принимаем $\beta_{\text{vn}} = 0,086 + 0,059 \cdot v$, где v – скорость движения воздуха;

W – коэффициент увлажнения кожи, $W \approx 0,2-1$; P_{koj} – парциальное давление водяного пара в насыщенном воздухе над кожей, Па; P_{ref} – парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе, Па.

Как видно из уравнения (7), количество теряемого тепла за счет испарения зависит от коэффициента увлажнения, скорости движения воздуха и разности парциальных давлений, которая меняется в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха.

Кроме того, по аналогии с организмом человека, в уравнение (1) введен дополнительно теплообмен при испарении вследствие диффузии паров воды через кожу. Для количественной оценки теплообмена за счет диффузии паров воды через кожу вымени используем следующую известную формулу:

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - P_{\text{koj}}]. \quad (8)$$

Процесс теплообмена поверхности вымени коровы с окружающей средой подразумевает равенство потоков мощности, поступающей из тела вымени и рассеиваемой в окружающую среду с поверхности вымени. Подставляя в уравнение (1) зависимости (2), (3), (5)-(8), получим:

$$\begin{aligned} \frac{k_{\text{koj}}}{d_{\text{koj}}} (T_{\text{vn}} - T_{\text{koj}}) = & 6,0 (T_{\text{kog}} - T_{\text{ref}}) + \\ & + 8,4(0,273 + \sqrt{v})(T_{\text{koj}} - T_{\text{ref}}) + \\ & + 0,2(0,086 + 0,059 \cdot v)(P_{\text{koj}} - P_{\text{ref}}) + \\ & + 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - P_{\text{koj}}], \end{aligned} \quad (9)$$

где приняты значения коэффициента увлажнения $W = 0,2$ для нормированных условий микроклимата и скорость воздуха $v > 0,6$ м/с, так как корова нахо-

дится в движении.

Приняли $T_{\text{vn}} = \text{const}$ для коров, обладающих гомойотермией, то есть способностью живого организма сохранять относительно постоянную температуру тела на уровне около 38 °С для млекопитающих, находящихся в термонейтральной зоне, в условиях нормированного микроклимата доильного зала. Тогда обозначим разность температур:

$$\delta T = (T_{\text{vn}} - T_{\text{koj}}). \quad (10)$$

С учетом выражения (10) преобразовали уравнение (9) с заменой, получили:

$$\begin{aligned} \delta T = \frac{d_{\text{koj}}}{k_{\text{koj}}} [& 6,0 (T_{\text{vn}} - T_{\text{ref}} - \delta T) + \\ & + 8,4(0,273 + \sqrt{v})(T_{\text{vn}} - T_{\text{ref}} - \delta T) + \\ & + 0,2(0,086 + 0,059 \cdot v)(P_{\text{koj}} - P_{\text{ref}}) + \\ & + 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - P_{\text{kog}})]. \end{aligned} \quad (11)$$

После преобразований выразили искомую разность температур внутреннего тела вымени и поверхности кожи:

$$\begin{aligned} \delta T = \frac{d_{\text{koj}}}{k_{\text{koj}}} [& 6,0 (T_{\text{vn}} - T_{\text{ref}}) + \\ & + 8,4(0,273 + \sqrt{v})(T_{\text{vn}} - T_{\text{ref}}) + 0,2(0,086 + \\ & + 0,059 \cdot v)(P_{\text{koj}} - P_{\text{ref}}) + 3,05 \cdot 10^{-3} \times \\ & \times (5733 - P_{\text{kog}})] / [1 + \frac{d_{\text{koj}}}{k_{\text{koj}}} [6 + \\ & + 8,4(0,273 + \sqrt{v})]]. \end{aligned} \quad (12)$$

Провели численную оценку снижения температуры поверхности вымени по формуле (12).

Приняли следующие значения:

$$d_{\text{koj}} = 0,37 \cdot 10^{-2} \text{ м}; k_{\text{koj}} = 0,8 \cdot 0,626 = 0,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Экспериментальных данных по внутренней температуре вымени коровы нет. Тогда приняли предположение, что теплоснабжение вымени осуществляется потоком крови (от 400 до 600 л крови на 1 л молока), при этом в молоке содержится от 86 до 89% воды. Вода – единственное вещество на Земле (кроме ртути), для которого зависимость удельной теплоемкости от температуры имеет минимум в районе 37 °С. Поэтому приняли $T_{\text{vn}} = 273 + 37,0 \text{ К}$.

Численные расчеты снижения температуры кожи вымени коровы выполнили с учетом нормативных значений температурно-влажностного индекса, порогом для которого считается значение 71, в то время как для высокопродуктивных коров тепловой стресс начинается при значении 68.

В таблице 1 приведены параметры вымени коровы без воспалительной патологии.

В качестве экспериментального подтверждения

Table 1		Таблица 1		
Параметры вымени коровы без воспалительной патологии Parameters of cow's udder without inflammatory pathology				
Параметр	Радиация	Конвекция	Испарение	Диффузия
Термодинамическая температура тела вымени, К	273 + 37			
Температура, относительная влажность, скорость воздуха в помещении	273 + 10, 70%; 1 м/с	273 + 15 70%; 1 м/с	273 + 20 70%; 1 м/с	273 + 25 70%; 1 м/с
Изменение температуры кожи вымени за счет радиационного теплообмена δT_1	1,07	0,87	0,67	0,47
Изменение температуры кожи вымени за счет конвективного теплообмена δT_2	1,90	1,55	1,20	0,85
Изменение температуры кожи вымени за счет испарения δT_3	0,07	0,1	0,13	0,18
Изменение температуры кожи вымени за счет диффузии воды δT_4	0,09	0,08	0,07	0,05
Сумма δT	3,13	2,60	2,07	1,55
Среднее значение и флуктуации температуры поверхности кожи вымени у коров	+0,53	2,60	-0,53	-1,05

наличия градиента температуры в коже гомойотермных организмов животных и человека могут быть данные исследования. Провели измерения по определению температурного градиента в коже человека и кролика, толщина которой составляет 2,0-2,5 мм.

Как следует из полученных сведений, при изменении внешней температуры от 15 до 30°C температурный градиент в коже спинки носа, спины и живота кролика на расстоянии 2-2,5 мм от поверхности кожи вглубь изменялся от 0,3 до 1,2°C. Для человека градиент температуры в коже груди составлял 1,29; 0,72 и 0,13°C при внешней температуре 15-17; 21-23 и 32-35°C соответственно. С учетом того, что кожа вымени почти в два раза больше и отсутствие информации по конвективному теплообмену при выполнении экспериментов с кроликом и человеком, расчетные данные *таблицы 1* вполне приемлемы.

Результаты и обсуждение. Из *таблицы 1* следует, что температура поверхности кожи вымени в термонеutralной зоне нормированного микроклимата помещения изменяется на значение ~0,1°C на каждый градус изменения температуры воздуха в помещении. Модель потерь тепла за счет излучения общепринята и, соответственно, снижение температуры поверхности кожи вымени будет соответствовать реальным значениям.

По конвективным теплопотерям имеются существенные расхождения. Используемые в модели формулы (4) и (5) дают максимально возможные значения из литературных источников. Изменения температуры кожи вымени за счет испарения и диффузии воды имеют разнонаправленный характер, а их сумма остается практически постоянной в рамках параме-

тров нормативного микроклимата доильного зала.

Термографическая установка кроме своего прямого назначения диагностики мастита у коров может быть использована и в рамках пассивного эксперимента по определению влияния температурно-влажностных режимов в помещении на температуру поверхности кожи вымени коровы.

Чтобы оценить значимость флуктуаций кожи вымени, сравнили эти результаты со статистическими характеристиками распределения радиационных температур по результатам термографических измерений температуры кожи вымени у коров по четырем группам заболевания маститом (*табл. 2*) [12, 13]:

- первая группа (–) отрицательная (жидкость однородная, водянистая, количество соматических клеток меньше 200 тыс./мл); отсутствие мастита;

- вторая группа (+) сомнительная (смесь однородная, однако появляется незначительная вязкость, которая исчезает через 30 с, количество соматических клеток от 200 до 500 тыс./мл); риск наличия мастита, необходимо лечение;

- третья группа (++) слабopоложительная (четко просматривается образование желе, но без формирования концентрированного сгустка, количество соматических клеток от 400 до 1500 тыс./мл); наличие воспалительного процесса, требуется лечение;

- четвертая группа (+++) положительная (формирование плотного сгустка, количество соматических клеток более 1500 тыс./мл); наличие острого мастита, необходимо лечение.

Полученные результаты исследований обработаны методом математической статистики.

Наблюдается существенное различие в значении

Table 2

Таблица 2

**Сравнение значений температур поверхности кожи вымени у коров,
полученных с помощью тепловизоров, по данным исследований [12, 13]**
**Comparison of surface temperature values of udder skin in cows obtained using thermal imagers,
according to the studies [12, 13]**

Параметр	США [12]				Беларусь [13]			
	–	+	++	+++	–	+	++	+++
Число измерений	75	33	84	37	30	30	30	30
Температура поверхности кожи вымени, среднее значение (<i>USST</i>), °C	33,2	34,6	35,7	36,3	36,2	37,3	38,5	39,6
Среднеквадратичное отклонение (<i>SD</i>), °C	0,82	0,72	0,60	0,46	0,81	0,46	0,44	0,46
Стандартная ошибка выборочного среднего (<i>SE</i>), °C	0,09	0,12	0,07	0,07	0,15	0,08	0,08	0,08
Разница средних температур поверхности кожи вымени между группами, °C	1,4		0,6		1,1		1,1	
			1,2				1,2	

ях средних температур поверхности кожи вымени коров, представленных в указанных источниках. Это может быть объяснено разными настройками тепловизоров на различные значения излучательной способности объекта. В тоже время градиент температур между разными группами животных по степени заболевания маститом можно считать близким.

Из анализа таблиц 1, 2 возможно сделать вывод о необходимости учета температурно-влажностных режимов в помещениях, где проводится термографическая диагностика воспалительных заболеваний у коров. Кроме этого, стоит учитывать и биологическое разнообразие, когда состояние животного меняется утро-вечер, до и после доения, день лактации и так далее. Для этого требуются алгоритмы накопления данных с последующей их статистической обработкой [13].

Выводы. Термография как неинвазивный метод диагностики воспалительных заболеваний у сельскохозяйственных животных – перспективный метод. Особую актуальность приобретает диагностика заболевания маститом в условиях поточного производства молока.

Обосновали методику, разработали математическую модель и получили количественные оценки флуктуаций термодинамической температуры вымени коров для условий нормативных значений температурно-влажностных индексов в помещениях для коров.

Учет температурно-влажностных параметров помещения можно рассматривать как необходимый элемент повышения надежности термографической диагностики мастита у коров. Кроме этого, необходимо учитывать и биологическое разнообразие, когда состояние животного меняется утро-вечер, до и после доения, день лактации и так далее. Для

этого требуются алгоритмы накопления больших объемов данных с последующей их статистической обработкой.

Библиографический список

- Collier R.J., Dahl G.E., VanBaale M.J. Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2006. Vol. 89. Iss. 4. 1244-1253. DOI: 10.3168/jds.s0022-0302(06)72193-2.
- Hirutski I.I., Rakevich Y.A., Stankov A.G. Selection of the information parameter for the thermography method of diagnostics of dairy cows mastitis. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. 2021. Vol. 67. Iss. 1. 14-18.
- Юрочка С.С., Павкин Д.Ю., Пехальский И.А. и др. Технология бесконтактной оценки физиологического состояния вымени для ранней диагностики заболеваний // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023. N5. С. 83-89. DOI: 10.31857/2500-2082/2023/5/83-89. EDN: XGIMFG.
- Harrap M.J.M., de Ibarra N.H., Whitney H.M. et al. Reporting of thermography parameters in biology: a systematic review of thermal imaging literature. *Royal Society Open Science*. 2018. Vol. 5. Iss. 12. 181281. DOI: 10.1098/rsos.181281.
- McManus R., Boden L.A., Weir W. et al. Thermography for disease detection in livestock: A scoping review. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022. Vol. 9. DOI: 10.3389/fvets.2022.965622. EDN: JUGTPO.
- Кузьмичев А.В. Описание процессов теплообмена в системе «животное-среда» // *Вестник ВИСХ*. 2017. N3(28). С. 33-38. EDN: ZURKGV.
- Ракевич Ю.А. Технология и средства для бесконтактной идентификации мастита коров термографическим методом в условиях поточного произ-

- водства молока // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2025. Т. 63. N1. С. 68-79. DOI: 10.29235/1817-7204-2025-63-1-68-79. EDN: JSTNAR.
8. Иванов А.П. Коррекция температуры биологических объектов в термографических методах // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2019. Т. 86. N1. С. 136-145. EDN: YTOTBB.
 9. Иванов А.П. Распределение ИК-излучения от нелокального источника внутри биологической ткани // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. 2018. Т. 54. N3. С. 316-325. DOI: 10.29235/1561-2430-2018-54-3-316-325. EDN: YNMDUL.
 10. Цвяк А.В. Математическая модель изменения температуры поверхности вымени во время доения // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2013. N3(11). С. 93-98. EDN: RCKAGJ.
 11. Вельматов А.А., Тишкина Т.Н., Аль-Исави А.А. Молочная продуктивность и функциональные свойства вымени у голштинизированных коров разных генотипов // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016. N3(35). С. 96-100. EDN: WMLDER.
 12. Polat B., Colak A., Cengiz M. et al. Sensitivity and specificity of infrared thermography in detection of subclinical mastitis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2010. Vol. 93. Iss. 8. 3525-3532. DOI: 10.3168/jds.2009-2807.
 13. Гируцкий И.И., Сеньков А.Г., Ракевич Ю.А. Статистический алгоритм обработки термографических снимков вымени коровы для диагностики мастита с использованием критерия Байеса // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2023. N1. С. 42-46. DOI: 10.21122/2309-4923-2023-1-42-46. EDN: ZEBZKK.
 - 83-89 (In Russian). DOI: 10.31857/2500-2082/2023/5/83-89. EDN: XGIMFG.
 4. Harrap M.J.M., de Ibarra N.H., Whitney H.M. et al. Reporting of thermography parameters in biology: a systematic review of thermal imaging literature. *Royal Society Open Science*. 2018. Vol. 5. Iss. 12. 181281. DOI: 10.1098/rsos.181281.
 5. McManus R., Boden L.A., Weir W. et al. Thermography for disease detection in livestock: A scoping review. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022. Vol. 9. DOI: 10.3389/fvets.2022.965622. EDN: JUGTPO.
 6. Kuzmichev A.V. Description of the processes of the heat exchange in a system «animal-environment». *Bulletin of VIESH*. 2017. N3(28). 33-38 (In Russian). EDN: ZURKGV.
 7. Rakevich Yu.A. Technology and tools for contactless identification of cow mastitis by thermographic method under conditions of flow-line milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2025. Vol. 63. N1. 68-79 (In Russian). DOI: 10.29235/1817-7204-2025-63-1-68-79. EDN: JSTNAR.
 8. Ivanov A.P. Correction of the temperature of biological objects in thermographic methods. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2019. Vol. 86. N1. 136-145 (In Russian). EDN: YTOTBB.
 9. Ivanov A.P. Distribution of IR radiation from a non-local source inside the biological tissue. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series*. 2018. Vol. 54. N3. 316-325 (In Russian). DOI: 10.29235/1561-2430-2018-54-3-316-325. EDN: YNMDUL.
 10. Tsvyak A.V. Mathematical model of the surface temperature of udder during milking. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Animal Husbandry Mechanization*. 2013. N3(11). 93-98 (In Russian). EDN: RCKAGJ.
 11. Velmatov A.A., Tishkina T.N., Al-Isavi A.A.Kh. Milk productivity and udder functional properties of holstein cows with different genotypes. *Bulletin of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2016. N3(35). 96-100 (In Russian). EDN: WMLDER.
 12. Polat B., Colak A., Cengiz M. et al. Sensitivity and specificity of infrared thermography in detection of subclinical mastitis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2010. Vol. 93. Iss. 8. 3525-3532. DOI: 10.3168/jds.2009-2807.
 13. Girutskiy I.I., Senkov A.G., Rakevich Y.A. Statistical Bayesian algorithm for processing thermographic images of the cow udder for diagnosing mastitis. *System Analysis and Applied Information Science*. 2023. N1. 42-46 (In Russian). DOI: 10.21122/2309-4923-2023-

References

1-42-46. EDN: ZEBZKK.

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 read and approved the final manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 26.05.2026

Статья принята к публикации 01.09.2026



Повышение точности управления беспилотной сельскохозяйственной техникой на основе сплайнового интерполирования кривой нагрузки

Александр Викторович Карпов¹,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: avk1963@inbox.ru;

Николай Иванович Гданский^{2,3},

доктор технических наук, профессор, e-mail: al-kpp@mail.ru;

Виталий Александрович Каргин^{2,4},

доктор технических наук, доцент, e-mail: vakargin@mail.ru;

Владимир Александрович Стрельников⁵,

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

¹Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;

²Российский биотехнологический университет, Москва, Российская Федерация;

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация;

⁴Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация;

⁵Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Российская Федерация

Реферат. В настоящее время внедрение автономных электрифицированных с адаптивными цифровыми системами управления транспортных средств, обеспечивающих беспилотную доставку и перемещение грузов, в том числе в ограниченных объемах складов и хранилищ, служит залогом революционного совершенствования логистики перевозок в сельскохозяйственных предприятиях и повышения эффективности отрасли в целом. Примером применения данных транспортных средств могут служить беспилотная доставка удобрений и средств защиты растений на поля, автоматизированный сбор урожая в садах и теплицах, транспортировка кормов на животноводческих комплексах. Для адекватного функционирования адаптивных цифровых систем управления транспортными средствами задача оптимального восстановления непрерывных кривых, например, траектории движения, нагрузки привода и др., по имеющимся дискретным значениям элементарно решается на основе алгоритмов сплайнового интерполирования функций. При этом показатели качества работы адаптивных цифровых систем управления транспортными средствами – точность, быстродействие – находятся в прямой зависимости от погрешности интерполирования (объема вычислительной работы) и определяются типом выбранных сплайнов. (Цель исследования) Определить тип сплайнов, обеспечивающий, при сопоставимой по объему вычислительной работе, минимальную погрешность и лучшую точность приближения полученных сплайновым интерполированием кривых к фактическим траекториям транспортных средств. (Материалы и методы) Предложены и численно исследованы, определяющие качество интерполирования, пять тестовых кривых для заданных и характерных в практике закономерностей движения транспортных средств. Представлен общий алгоритм расчета гарантированной точности интерполирования линейными, квадратичными и кубическими сплайнами. (Результаты и обсуждение) Сравнением показателей интерполирования по алгоритму гарантированной точности показано, что наименьшую погрешность результатов вычислений обеспечивают кубические интерполяционные сплайны Фергюссона. (Выводы) Показано, что интерполяция кусочной алгебраической кривой кубическими сплайнами Фергюссона повышает, в сравнении со сплайнами Лагранжа, гарантированную точность расчета, но предполагает увеличение ориентировочно в 1,7 раза вычислительных затрат на определение коэффициентов в сравнении с данным типом сплайнов.

Ключевые слова: адаптивная автоматизированная система управления, интерполяция, параметры модели, синтез управляющего воздействия, сплайн Лагранжа, сплайн Фергюссона, точное

земледелие, беспилотные технологии, сельскохозяйственная робототехника, автоматизация сельского хозяйства, электропривод сельскохозяйственной техники.

Для цитирования: Карпов А.В., Гданский Н.И., Каргин В.А., Стрельников В.А. Повышение точности управления беспилотной сельскохозяйственной техникой на основе сплайнового интерполирования кривой нагрузки // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2026. Т. 73. N3. С. 65-72. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-65-72. EDN: UVULEU.

Scientific article

Improving the Control Accuracy of Unmanned Agricultural Vehicles Based on Spline Interpolation of the Load Curve

Aleksandr V. Karpov¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor, e-mail: avk1963@inbox.ru;

Nikolay I. Gdanskiy^{2,3},

Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: al-kpp@mail.ru;

Vitaliy A. Kargin^{2,4},

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

Vladimir A. Strelnikov⁵,

Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: vladimirstrelnikov@yandex.ru

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;

²Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation;

³National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation;

⁴Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation;

⁵Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russian Federation

Abstract. *Currently, the introduction of autonomous electrified vehicles with adaptive digital control systems that provide unmanned delivery and movement of goods, including in limited volumes of warehouses and storages, is the key to revolutionary improvement of transportation logistics in agricultural enterprises and increasing the efficiency of the industry as a whole. An example of the use of these vehicles can be the unmanned delivery of fertilizers and plant protection products to fields, automated harvesting in gardens and greenhouses, and the transportation of feed to livestock complexes. For the adequate functioning of adaptive digital vehicle control systems, the problem of optimal recovery of continuous curves, for example, motion trajectories, drive loads, etc., according to the available discrete values, is elementary solved on the basis of algorithms for spline interpolation of functions. At the same time, the performance indicators of adaptive digital vehicle control systems – accuracy, speed – are directly dependent on the interpolation error (amount of computational work) and are determined by the type of selected splines. (Research Purpose) The research purpose is determining the type of splines that provides, with a comparable amount of computational work, the minimum error and the best accuracy of approximating the curves obtained by spline interpolation to the actual trajectories of vehicles. (Materials and methods) Proposed and numerically investigated, determining the quality of interpolation, five test curves for the given and characteristic in practice patterns of movement of vehicles. A general algorithm for calculating the guaranteed accuracy of interpolation by linear, quadratic and cubic splines is presented. (Results and discussion) By comparing the interpolation indicators using the guaranteed accuracy algorithm, it is shown that the smallest error in the calculation results is provided by cubic Ferguson interpolation splines. (Conclusions) It is shown that the interpolation of a piecewise algebraic curve by cubic Ferguson splines increases, in comparison with Lagrange splines, the guaranteed accuracy of the calculation, but assumes an increase of approximately 1.7 times the computational costs for determining the coefficients in comparison with this type of splines.*

Keywords: *adaptive automated control system, interpolation, model parameters, control action synthesis, Lagrange spline, Ferguson spline, precision agriculture, unmanned technologies, agricultural robotics, agricultural automation, electric drives for agricultural machinery.*

For citation: Karpov A.V., Gdansky N.I., Kargin V.A., Strelnikov V.A. Improving the control accuracy of unmanned agricultural vehicles based on spline interpolation of the load curve. Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex. 2025. Vol. 72. N4. 65-72 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-65-72. EDN: UVULEU

На современном этапе развития разработки и создания управляющих устройств для широкого класса динамических объектов применение ЭВМ является ключевым условием устранения недостатков аналоговых прототипов и создания адаптивных систем управления высокого качества, в частности, автономных электрифицированных транспортных средств (ТС) (платформ) с безоператорным адаптивным управлением [1, 2]. Примером применения таких ТС могут служить беспилотная доставка удобрений и средств защиты растений на поля, автоматизированный сбор урожая в садах и теплицах, транспортировка кормов на животноводческих комплексах и др.

В математическом обеспечении алгоритмов таких цифровых систем необходимой является задача восстановления непрерывных кривых (определяющих, например, траекторию ТС, силовой вектор внешней нагрузки на валу привода и др.) по имеющимся дискретным значениям [3, 4]. Сплайновое интерполирование функций для выполнения таких задач представляется предпочтительным; при этом отклонения полученных решений от реальных кривых и, соответственно, важный показатель качества – точность проектируемой системы – существенно зависят от типа выбранных сплайнов [5, 6].

Цель исследования – определить тип сплайнов, обеспечивающий при сопоставимой по объему вычислительной работе минимальную погрешность и оптимальную точность приближения полученных сплайновым интерполированием кривых к фактическим траекториям транспортного средства, и обосновать его применимость для повышения эффективности работы беспилотной сельскохозяйственной техники.

Материалы и методы. В ряде исследований показано, что сплайновая интерполяция кусочной алгебраической кривой обеспечивает оптимальное приближение к реальной гладкой траектории движения транспортного средства [7, 8]. Однако оценка погрешности интерполяции кусочных кривых различными типами сплайнов требует отдельного исследования [9, 10].

На *рисунке* показан пример последовательных участков данной траектории. Введем следующие обозначения: $\bar{m}^k$ – вектор частных производных, входящих в силовой вектор $\bar{M}^k$ порядка k [3]; p – длина вектора $\bar{m}^k$; $\bar{I}_{(i)}$ – вектор точных интегралов при ко-

эффициентах вектора $\bar{m}^k$ для отрезка $[\tau_i; \tau_{i+1}]$ – вектор приближенных интегралов, соответствующих выбранному методу интерполирования траектории; ψ – угол поворота приводного вала.

Тогда точное значение приведенной работы на отрезке $[\tau_i; \tau_{i+1}]$:

$$A_i = M(\psi_{i+1} - \psi_i) + (\bar{m}^k, \bar{I}_{(i)}). \quad (1)$$

Приближенное значение приведенной работы на отрезке $[\tau_i; \tau_{i+1}]$ при выбранном методе интерполирования траектории [11]:

$$A_{\text{пр}(i)} = M(\psi_{i+1} - \psi_i) + (\bar{m}^k, \bar{I}_{\text{пр}(i)}). \quad (2)$$

Разность точного и приближенного значений работы на отрезке $[\tau_i; \tau_{i+1}]$:

$$\Delta A_i = A_i - A_{\text{пр}(i)} = (\bar{m}^k, (\bar{I}_{(i)} - \bar{I}_{\text{пр}(i)})). \quad (3)$$

Используя неравенство Коши-Буняковского, оценим абсолютную величину разности работ, а применяя норму векторов в евклидовом пространстве:

$$|\Delta A_i| = |(\bar{m}^k, (\bar{I}_{(i)} - \bar{I}_{\text{пр}(i)}))| \leq |\bar{m}^k| \cdot |\bar{I}_{(i)} - \bar{I}_{\text{пр}(i)}|, \quad (4)$$

$$\text{где } |\bar{I}_{(i)} - \bar{I}_{\text{пр}(i)}| = \sqrt{\sum_{j=1}^p (I_{(i)j} - I_{\text{пр}(i)j})^2}.$$

Полученную абсолютную оценку (4) точности расчета приведенной работы для одного отрезка траектории назовем парциальной.

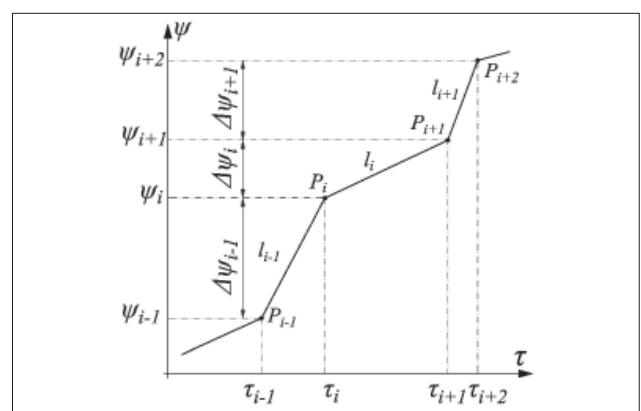


Рис. К решению задачи оценки погрешности интерполирования траектории движения автономного транспортного средства

Fig. Solving the problem of estimating interpolation error of an autonomous vehicle's trajectory

Оценим разность работ для совокупности n подряд идущих отрезков времени $[\tau_0 = 0; \tau_1]$, $[\tau_1; \tau_2]$, ...,

$[\tau_{n-1}; \tau_n]$. Так как при построении сплайнов, наряду с интерполируемым отрезком, необходимы данные о функции в окрестностях, суммирование выполним по всем отрезкам, кроме крайних с номерами 0 и $(n-1)$:

$$I_{120} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau \cdot d\tau = \delta_{2(i)}. \quad (5)$$

Полученную абсолютную оценку точности расчета приведенной работы для всей траектории назовем полной. В левой части абсолютная величина разности расчета приведенной работы зависит от метода интерполирования (обозначим его Mth), вектора частных производных $\bar{m}^k$ и модуля вектора точных значений интегралов $\bar{I}_{(i)}$.

Введём относительную погрешность полной работы $\delta A(Tr, Mth, k)$, зависящую от формы траектории (обозначим ее Tr), метода интерполирования Mth и порядка модели нагрузки k :

$$I_{211} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \psi''(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 0. \quad (6)$$

Примем $\delta A(Tr, Mth, k)$ в качестве критерия влияния метода интерполирования на относительную погрешность расчета работы при выбранном методе интерполирования Mth на траектории Tr . Очевидно, что качество интерполирования траектории выбранным методом возрастает с уменьшением значения $\delta A(Tr, Mth, k)$.

В методах управления с прогнозированием внешней нагрузки используют модель изменения нагрузки от 0 до некоторого максимального значения k [3]. Поскольку в начало вектора коэффициентов $\bar{M}^k$ модели нагрузки максимального порядка k входят все коэффициенты векторов $\bar{M}^l$ всех моделей нагрузки более низких порядков $q < k$, то при минимальном значении $\delta A(Tr, Mth, k)$ будут близки к минимальным значения $\delta A(Tr, Mth, q)$. Поэтому для оценки качества интерполирования достаточно определить оптимальный метод интерполирования для максимального порядка k , используемого при реализации управления с прогнозированием внешней нагрузки. На практике второй порядок модели нагрузки ($k=2$) представляется достаточным.

Для оценки результатов проанализируем пять тестовых кривых, определяющих пять закономерностей качества интерполирования. На каждой выберем 16 точек $\psi_i = i, \tau_i, (i = 0, \dots, n = 15)$, которые моделируют инкрементный способ измерения перемещения с шагом 1 на 15 (*рис.*), при котором выполняется условие: $\psi_{i+1} - \psi_i = 1, (i = 0, \dots, n-1 = 14)$. Для краткости обозначим величину $\delta_{k(i)}$ на отрезке $[\tau_i; \tau_{i+1}]$ в виде:

$$\delta_{k(i)} = \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \tau^{k-1} d\tau = \frac{\tau_i^k - \tau_{i-1}^k}{k},$$

где $k=1, 2, \dots, n$.

В результате имеем:

1. Линейное перемещение:

$$\psi_{(1)}(\tau) = \tau^1; \psi_{(1)}'(\tau) = 1; \psi_{(1)}''(\tau) = 0; \tau_{(1)i} = i.$$

$$I_{110} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau \cdot d\tau = \delta_{2(i)};$$

$$I_{120} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau \cdot d\tau = \delta_{2(i)}.$$

$$I_{211} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \psi''(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 0.$$

$$I_{210} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \delta_{3(i)};$$

$$I_{220} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \delta_{3(i)}; \quad (7)$$

$$I_{230} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^3 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \delta_{3(i)}.$$

2. Квадратичное перемещение:

$$\psi_{(2)}(\tau) = \tau^2; \psi_{(2)}'(\tau) = 2\tau; \psi_{(2)}''(\tau) = 2; \tau_{(2)i} = \sqrt{i}.$$

$$I_{110} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau \cdot d\tau = 2\delta_{3(i)};$$

$$I_{120} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau \cdot d\tau = 4\delta_{4(i)};$$

$$I_{211} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \psi''(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 4\delta_{4(i)};$$

$$I_{210} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 2\delta_{4(i)};$$

$$I_{220} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 4\delta_{5(i)};$$

$$I_{230} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^3 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 8\delta_{6(i)}. \quad (8)$$

3. Кубическое перемещение:

$$\psi_{(3)}(\tau) = \tau^3; \psi_{(3)}'(\tau) = 3\tau^2; \psi_{(3)}''(\tau) = 6\tau; \tau_{(3)i} = \sqrt[3]{i}.$$

$$I_{110} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau \cdot d\tau = 3\delta_{4(i)};$$

$$I_{120} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau \cdot d\tau = 9\delta_{6(i)};$$

$$I_{211} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \psi''(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 18\delta_{6(i)};$$

$$I_{210} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 3\delta_{5(i)};$$

$$I_{220} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 9\delta_{7(i)};$$

$$I_{230} = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^3 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = 27\delta_{9(i)}. \quad (9)$$

4. Перемещение по кривой, соответствующей квадратному корню:

$$\psi_{(4)}(\tau) = \sqrt{\tau+1}; \psi_{(4)}'(\tau) = \frac{0,5}{\sqrt{\tau+1}};$$

$$\begin{aligned}
\psi_{(4)}''(\tau) &= \frac{-0,25}{(\sqrt{\tau+1})^{1,5}}; \quad \tau_{(4)i} = i^2 - 1 \\
I_{110} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau \cdot d\tau = \frac{(\tau-2)\sqrt{\tau+1}}{3} \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}; \\
I_{120} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau \cdot d\tau = \frac{\delta_{1(i)}}{4} - \frac{1}{4} \ln \left(\frac{\tau_{i+1}+1}{\tau_i+1} \right); \\
I_{211} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \psi''(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \\
&= -\frac{\delta_{1(i)}}{8} + \frac{1}{4} \ln \left(\frac{\tau_{i+1}+1}{\tau_i+1} \right) + \frac{1}{8\tau_{i+1}+1} - \frac{1}{8\tau_i+1}; \\
I_{210} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \frac{(8-4\tau+3\tau^2)\sqrt{\tau+1}}{15} \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}; \\
I_{220} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \frac{1}{4} \left[\delta_{2(i)} - 2\delta_{1(i)} + \ln \left(\frac{\tau_{i+1}+1}{\tau_i+1} \right) \right]; \\
I_{230} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^3 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \frac{(-8-4\tau+\tau^2)}{12\sqrt{\tau+1}} \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}. \quad (10)
\end{aligned}$$

5. Перемещение по синусоиде:

$$\begin{aligned}
\psi_{(5)}(\tau) &= 16 \sin \tau; \quad \psi_{(5)}'(\tau) = 16 \cos \tau; \\
\dot{\psi}_{(5)}''(\tau) &= 16 \sin \tau; \quad \tau_{(5)i} = \arcsin \left(\frac{i}{6} \right) \\
I_{110} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau \cdot d\tau = 16(\cos \tau + \tau \cdot \sin \tau) \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}; \\
I_{120} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau \cdot d\tau = \\
&= 64 \left[2\tau \cdot \cos \tau \cdot \sin \tau + \cos^2 \tau + \tau^2 \right] \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}; \\
I_{211} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \psi''(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \\
&= 64 \left[\tau^2 (2 \cos^2 \tau - 1) - \tau \cdot \sin 2\tau - \cos^2 \tau \right] \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}; \\
I_{210} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \psi'(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \\
&= 16 \left[\tau^2 \cdot \sin \tau + 2\tau \cdot \cos \tau - 2 \cdot \sin \tau \right] \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}; \\
I_{220} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^2 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \\
&= 32 \left[\frac{4}{3} \tau^3 + 2\tau^2 \cdot \sin 2\tau + 2\tau \cdot \cos 2\tau - \sin 2\tau \right] \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}; \\
I_{230} &= \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\psi'(\tau))^3 \cdot \tau^2 \cdot d\tau = \\
&= \frac{4096}{3} \left[\tau^2 \cdot \sin \tau \cdot (\cos^2 \tau + 2) + 2\tau \cdot \cos \tau \left(\frac{1}{3} \cos^2 \tau + 2 \right) - \right. \\
&\quad \left. - \frac{2}{9} \sin \tau (\cos^2 \tau + 20) \right] \Big|_{\tau_i}^{\tau_{i+1}}. \quad (11)
\end{aligned}$$

Первая закономерность определяет равномерное перемещение с постоянной скоростью, вторая и третья – ускоренное движение, четвертая и пятая – замедленное. В перемещении по кривой 4, соответ-

ствующей квадратному корню, принят сдвиг по оси τ на 1, устраняющий бесконечные значения первой производной $\psi'(\tau)$ в начале траектории при $\tau = 0$.

Для модели нагрузки второго порядка, наряду с оценкой качества интерполирования, представляется целесообразным представить алгоритм расчета гарантированной точности [12, 13].

Для $k=2$ длина вектора $\bar{m}^2$ частных производных, входящих в силовой вектор $\bar{M}^2$, при $p=5$ коэффициенты $\bar{m}^2$ имеют вид:

$$\bar{m}^2 = \left\{ \frac{\partial M}{\partial t}; \frac{\partial M}{\partial \psi}; \frac{\partial^2 M}{\partial \tau^2}; \frac{\partial^2 M}{\partial \tau \partial \psi}; \frac{\partial^2 M}{\partial \psi^2} \right\}. \quad (12)$$

При коэффициентах вектора вектор точных и приближенных интегралов $\bar{I}$, выраженный через траекторные интегралы, определится следующим образом:

$$\bar{I} = (I_{110}, I_{120}, I_{211}, I_{210}, I_{220}, I_{230}). \quad (13)$$

Формула для гарантированной точности $\delta A(Tr, Mth, 2)$ расчета относительной приведенной работы в модели нагрузки второго порядка траектории Tr_s с номером s и с использованием метода ее интерполирования $Mthr$ с номером r принимает вид:

$$\delta A(Tr_s, Mthr, 2) = \frac{\sum_{i=1}^{13} \sqrt{\sum_{j=1}^5 (I_{(i)j} - I_{np(i)j})^2}}{\sum_{i=1}^{13} \sqrt{\sum_{j=1}^5 (I_{(i)j})^2}}, \quad (14)$$

где для выбранной траектории Tr_s :

- $I_{(i)j}$ – точное значение интеграла при коэффициенте вектора $\bar{m}^2$ с номером j для участка Tr_s с номером i ;

- $I_{np(i)j}$ – аналогичное приближенное значение интеграла при коэффициенте вектора $\bar{m}^2$ с номером j для участка Tr_s с номером i , соответствующее методу интерполирования $Mthr$.

Таким образом, алгоритм расчета гарантированной точности представляется в следующей последовательности:

1. Расчет точных значений интегралов по соответствующим формулам для отрезков с номерами $i=1,2,...,13$.

2. Расчет суммарного модуля точных значений интегралов $\{I_1 - I_5\}_{(i)}$ – знаменателя формулы (14).

3. Для каждого вида локальных сплайнов (линейных, квадратичных или кубических) в цикле по отрезкам с номерами $i=1,2,...,13$ рассчитывают значения для геометрических условий, по которым определяют значения коэффициентов сплайнов.

4. Коэффициенты сплайнов подставляют в соответствующие формулы, по которым рассчитывают приближенные значения интегралов.

5. Точные $\{I_1 - I_5\}_{(i)}$ и приближенные $\{I_1 - I_5\}_{np(i)}$ значения интегралов подставляем в формулу (14), по которой рассчитывают искомое значение гарантированной точности.

Table	Таблица				
Значения гарантированной точности $\delta A(Tr, Mth, 2)$ для различных тестовых кривых и методов интерполирования Guaranteed accuracy values $\delta A(Tr, Mth, 2)$ for various test curves and interpolation methods					
	Траектории				
	Линейное перемещение	Квадратичное перемещение	Кубическое перемещение	Перемещение по кривой, соответствующей квадратному корню	Перемещение по синусоиде
Линейные сплайны, $N = 1$					
Сплайн Лагранжа	0,0	0,07057	0,07949	0,00291	0,08038
Расширенный сплайн Лагранжа	0,0	0,07526	0,08462	0,00291	0,08570
Взвешенный расширенный сплайн Лагранжа	0,0	0,07405	0,08328	0,00291	0,08289
Квадратичные сплайны, $N = 2$					
Сплайн по усредненным производным в крайних точках	0,0	0,0070	0,00780	0,00227	0,089421
Сплайн по взвешенным производным в крайних точках	0,0	0,0187	0,02531	0,00180	0,139849
Кубические сплайны, $N = 3$					
Сплайны Фергюссона	0,0	0,00006	0,0017	0,00141	0,0147
Сплайн по усредненным производным в крайних и средней точках	0,0	0,0018	0,00264	0,00071	0,031524

Для примера результаты значений гарантированной точности $\delta A(Tr, Mth, 2)$ для различных тестовых кривых и методов интерполирования представлены в **таблице**, в которой показано, что кубические интерполяционные сплайны Фергюссона обеспечивают лучший результат для кривых 2, 3 и 5, а кубические локальные сплайны по усредненным производным в крайних и средней точках – для кривой 4 [14, 15].

Результаты и обсуждение. Сравнением показателей интерполирования по алгоритму гарантированной точности показано, что наименьшую погрешность результатов вычислений обеспечивают кубические интерполяционные сплайны Фергюссона. Особенность данного метода для беспилотной сельскохозяйственной техники заключается в повышении точности планирования траектории, что позволяет более эффективно использовать в том числе топливно-энергетические ресурсы и избегать столкновения с препятствиями. Более конкретная оценка нагрузки привода позволяет оптимизировать энергопотребление и продлить время автономной работы техники.

В дополнение к критериям предпочтительности практического использования полученных результатов целесообразно оценить трудоемкость расчета гарантированной точности, ограничившись, согласно **таблице**, рассмотрением определения коэффициентов лишь кубических локальных сплайнов по усредненным производным, коэффициенты которых определяются для глобальной переменной.

Расчет n сплайнов Фергюссона для локальных переменных требует выполнения $9n-3$ сложений,

$8n-3$ умножений, $4n-2$ делений. Однако при переходе к каноническому виду по глобальной переменной суммарные вычислительные затраты радикально увеличиваются до $28n-3$ сложений, $36n-3$ умножений, $6n-2$ делений. Прямой сокращенный расчет коэффициентов без использования полиномов Эрмита позволяет снизить общие вычислительные затраты до $16n-18$ сложений, $12n-5$ умножений, $4n-2$ делений.

Представим расчет n кубических локальных сплайнов по усредненным производным в крайних и средней точках. Предварительно определим в расчетных формулах коэффициентов следующий набор повторяющихся величин:

- 1) $\tau_{i(k\theta)} = \tau_i^2, (i = 0, 1, \dots, n+1)$;
- 2) $\Delta\psi_i = \psi_i - \psi_{i-1}, (i = 0, 1, \dots, n+1)$;
- 3) $l_i = \tau_i - \tau_{i-1}, (i = 0, 1, \dots, n+1)$;
- 4) $\psi'_i = \frac{(\Delta\psi_{i-1} - \psi_i)}{(l_{i-1} + l_i)}, (i = 1, \dots, n+1)$.

Расчетные формулы для каждого сплайна с номером $i (i = 1, \dots, n)$:

$$\begin{cases} \psi'_{i(cp)} = \frac{\Delta\psi_i}{l_i}; \\ \tau_{i(cp)} = 0,5(\tau_i + \tau_{i+1}); \\ C_{3(i)} = \frac{2(\psi'_{i+1} + \psi'_i - 2\psi'_{i(cp)})}{l_i^2}; \\ C_{2(i)} = \frac{2[\psi'_{i(cp)} - \psi'_i - C_{3(i)}(\tau_{i(cp)}^2 - \tau_{i(k\theta)})]}{l_i}; \\ C_{1(i)} = \psi'_i - C_{2(i)}\tau_i - C_{3(i)}\tau_{i(k\theta)}. \end{cases}$$

Суммарные вычислительные затраты составляют

$12n+4$ сложений, $10n+1$ умножений, $4n+1$ делений. Существенное ($2n$) снижение вычислений сравнительно с прямым расчетом коэффициентов сплайнов Фергюссона, получено исключительно при выполнении сложения ($6n$). Число выполняемых делений с точностью до постоянных слагаемых одинаково.

Выводы. Представленные в **таблице** результаты сравнений показывают, что интерполирование определяющих действие ТС траекторий сплайнами Фергюссона с прямым сокращенным расчетом их коэффициентов требует увеличения вычислительных затрат на определение их значений ориентировочно в 1,7 раза. Однако это не является ограничением для современной элементной базы или программного обеспечения и позволяет существенно повысить гарантированную точность расчета. При проектировании систем управления автономными транспортными средствами для сельского хозяйства, особенно в задачах, требующих высокой точности позиционирования рабочих органов, рекомендуется использовать кубические сплайны Фергюссона с прямым сокращенным расчетом коэффициентов, несмотря на повышенные вычислительные затраты.

Библиографический список

- Magdici S., Althoff M. Adaptive cruise control with safety guarantees for autonomous vehicles. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50. Iss. 1. 5774-5781. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.418.
- Dekkata C., Yi S. Improved steering and adaptive cruise control for autonomous vehicles using model predictive control. *Journal of Mechatronics and Robotics*. 2019. Vol. 3. Iss. 1. 378-388. DOI: 10.3844/jmrsp.2019.378.388.
- Гданский Н.И., Каргин В.А., Карпов А.В. и др. Адаптивное управление с прогнозированием внешней нагрузки в автономных электрифицированных платформах // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N1. С. 115-121. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-115-121. EDN: MOOXRХ.
- Liu Z., Hu J., Song T. et al. A methodology based on deep reinforcement learning to autonomous driving with double q-learning. In 2021 7th International Conference on Computer and Communications. 2021. 1266-1271. DOI: 10.1109/ICCC54389.2021.9674600.
- Федосеев В.М. Формула дискретной интерполяции // *Математическое образование*. 2023. N2(106). С. 32-36. EDN: ZVQNRN.
- Ююкин И.В. Оптимальная сплайн-траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2022. Т. 14. N2. С. 230-247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247. EDN: JYHSIY.
- Гданский Н.И., Карпов А.В., Бугаенко А.А. Оптимальное интерполирование типовых динамик в задаче управления с прогнозированием // *Инженерный вестник Дона*. 2012. N3(21). С. 277-282. EDN: PJZWOT.
- Карпов А.В., Гданский Н.И., Каргин В.А. и др. Интерполирование траекторий и синтез параметров управляющих воздействий приводов беспилотных систем степенными сплайнами // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. N2(59). С. 117-124. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-117-124. EDN: ZZABHP.
- Волков Ю.С. Сходимость процессов сплайн-интерполяции и обусловленность систем уравнений построения сплайнов // *Математический сборник*. 2019. Т. 210. N4. С. 87-102. DOI: 10.4213/sm8964. EDN: TJGYHC.
- Salim S.H., Jwamer K.H.F., Saeed R.K. Solving Volterra-Fredholm integral equations by natural cubic spline function. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*. 2023. N1(109). 124-130. DOI: 10.31489/2023M1/124-130. EDN: HKZIGK.
- Jwamer K.H.F., Ahmed Sh.Sh., Abdullah D.Kh. Approximate solution of Volterra integro-fractional differential equations using quadratic spline function. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*. 2021. N1(101). 50-64. DOI: 10.31489/2021M1/50-64. EDN: SZJGLE.
- Абдуллаева Г., Нуралиев Ф.А. Свойства обобщенного сплайна четвертого порядка. Натуральные сплайны // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. 2023. NS3/1(50). С. 118-136. EDN: SGVTSJ.
- Бахромов С.А. Построение квадратурных формул с помощью одного локального интерполяционного кубического сплайна Дефекта-2 // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. 2023. NS2(48). С. 90-100. EDN: APTTWZ.
- Ююкин И.В. Интерполяция навигационной функции сплайном Лагранжева типа // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2020. Т. 12. N1. С. 57-70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70. EDN: PZAOIV.
- Чекалин А.А., Решетников М.К. Оптимизация геометрической модели поверхности использованием гетерогенных интерполяционных сплайнов //

Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. N3(86). С. 25-33. EDN: YKUXZD.

References

- Magdici S., Althoff M. Adaptive cruise control with safety guarantees for autonomous vehicles. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50. Iss. 1. 5774-5781. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.418.
- Dekkata C., Yi S. Improved steering and adaptive cruise control for autonomous vehicles using model predictive control. *Journal of Mechatronics and Robotics*. 2019. Vol. 3. Iss. 1. 378–388. DOI: 10.3844/jmr-sp.2019.378.388.
- Gdanskiy N.I., Kargin V.A., Karpov A.V. et al. Adaptive control with forecasting external load in autonomous electrified platforms. *Electrical technologies and equipment in the agro-industrial complex*. 2024. Vol. 71. N1. 115-121 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-115-121. EDN: MOOXR.
- Liu Z., Hu J., Song T. et al. A methodology based on deep reinforcement learning to autonomous driving with double q-learning. In 2021 7th International Conference on Computer and Communications. 2021. 1266–1271. DOI: 10.1109/ICCC54389.2021.9674600.
- Fedoseev V.M. Equation of discrete interpolation. *Mathematical Education*. 2023. N2(106). 32-36 (In Russian). EDN: ZVQNRN.
- Yuyukin I.V. Optimal spline trajectory of the ship informative route in the mat-aided navigation. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2022. Vol. 14. N2. 230-247 (In Russian). DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247. EDN: JYHSIY.
- Gdanskiy N.I., Karpov A.V., Bugaenko A.A. Optimal interpolation of typical dynamics in a control problem with forecasting. *Engineering bulletin of Don*. 2012. N3(21). 277-282 (In Russian). EDN: PJZWOT.
- Karpov A.V., Gdanskyy N.I., Kargin V.A. et al. Interpolation of trajectories and synthesis of parameters of control actions of drives unmanned systems by power splines. *Electrotechnologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2025. Vol. 72. N2(59). 117-124 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-117-124. EDN: ZZABHP.
- Volkov Yu.S. Convergence of spline interpolation processes and conditionality of systems of equations for spline construction. *Mathematical Collection*. 2019. Vol. 210. N4. 87-102 (In Russian). DOI: 10.4213/sm8964. EDN: TJGYHC.
- Salim S.H., Jwamer K.H.F., Saeed R.K. Solving Volterra-Fredholm integral equations by natural cubic spline function. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*. 2023. N1(109). 124-130. DOI: 10.31489/2023M1/124-130. EDN: HKZIGK.
- Jwamer K.H.F., Ahmed Sh.Sh., Abdullah D.Kh. Approximate solution of Volterra integro-fractional differential equations using quadratic spline function. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*. 2021. N1(101). 50-64. DOI: 10.31489/2021M1/50-64. EDN: SZJGLE.
- Abdullaeva G., Nuraliev F.A. Properties of a Generalized Fourth-Order Spline. *Natural Splines. Problems of Computational and Applied Mathematics*. 2023. NS3/1(50). 118-136 (In Russian). EDN: SGVTSJ.
- Bakhromov S.A. Construction of quadrature equations using one local interpolation cubic spline Defect-2. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 2023. NS2(48). 90-100 (In Russian). EDN: APTTWZ.
- Yuyukin I.V. Interpolation of the navigational function by the Lagrange type spline. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2020. Vol. 12. N1. 57-70 (In Russian). DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70. EDN: PZAOIV.
- Chekalin A.A., Reshetnikov M.K. Geometric optimization of the surface models using heterogeneous spline interpolations. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2020. N386). 25-33 (In Russian). EDN: YKUXZD.

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 26.05.2026

Статья принята к публикации 10.09.2026



Оценка эффективности моделирования параметров элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна

Имран Парвизович Гаджиев¹,

кандидат технических наук, e-mail: imgadjiev@mail.ru;

Николай Владимирович Лимаренко²,

доктор технических наук, доцент;

Иван Алексеевич Успенский³,

доктор технических наук, профессор;

Парвиз Имранович Гаджиев¹,

доктор технических наук, профессор;

Гюльбике Гудретдиновна Рамазанова¹,

кандидат технических наук, доцент

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

²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация;

³Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, Российская Федерация

Реферат. Цифровизация, моделирование элеватора с интенсификатором сепарации почвы дают возможность решения оценки потребляемой мощности сил транспортирования и сепарации пласта на картофелеуборочных комбайнах. Комплекс осуществляет автоматический расчет мощности и силовых характеристик на основе вводимых пользователем технологических параметров и наглядных графических моделей, разработанных по техническому заданию. (Цель исследования) Оценить эффективность моделирования параметров элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна. (Материалы и методы) Предусмотрели для решения задач моделирования интуитивно понятный графический интерфейс с полями ввода и кнопкой запуска вычислений. Установили, что система обеспечивает визуализацию результатов расчета в виде четырех аналитических графиков. Определили, что эффект от применения программного комплекса состоит в сокращении временных затрат на расчет параметров качества сепарации в 5-7 раз, повышении точности определения критических режимов работы оборудования, оперативном анализе влияния технологических параметров на энергетические показатели. (Результаты и обсуждение) Предложили цифровой продукт, реализующий функции ассистента по созданию и ведению базы данных, для оценки эффективности моделирования параметров элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна. (Выводы) Показали, что работа программы выстроена в соответствии с требованиями современного законодательства в сфере сельского хозяйства и экологии. Выявили, что предложенный вариант автоматизированного учета удобен и прост в использовании, применим для установки на смартфон, что позволяет экономить время специалиста, ведущего учет, повышая тем самым производительность труда, а также обеспечивая доступ к информации в любой момент времени. Показали, что в будущем программа может быть усовершенствована и дополнена функцией формирования и подачи online – отчетности в систему отчетов Министерства сельского хозяйства РФ.

Ключевые слова: цифровое моделирование, расчет параметров, интенсификатор, элеватор, сепарация почвы, эффективность моделирования.

Для цитирования: Гаджиев И.П., Лимаренко Н.В., Успенский И.А., Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г. Оценка эффективности моделирования параметров элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 73-80. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-73-80. EDN: WCKROV.

Evaluation of the Efficiency of Modeling the Parameters of an Elevator with a Potato Harvester Intensifier

Imran P. Gadzhiev¹,

Ph.D.(Eng.), e-mail: imgadzhiev@mail.ru;

Nikolay V. Limarenko²,

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

Ivan A. Uspenskiy³,

Dr.Sc.(Eng.), professor;

Parviz I. Gadzhiev¹,

Dr.Sc.(Eng.), professor;

Gulbike G. Ramazanova¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor

¹Russian State University of National Economy named after V.I. Vernadskiy, Balashikha, Russian Federation;

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation;

³Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation

Abstract. Digitalization, modeling of an elevator with a soil separation intensifier, make it possible to assess the power consumption of the transport and separation forces of the formation on potato harvesters. The complex automatically calculates power and power characteristics on the basis of user input technological parameters and visual graphical models developed according to the technical specification. (Research purpose) The research purpose is evaluating the effectiveness of modeling the parameters of the elevator with a potato harvester intensifier. (Materials and methods) To solve modeling problems, an intuitively conceptual graphical interface with input fields and a start button for calculations was provided. The system provides visualization of the calculation results in the form of four analytical graphs. It was determined that the effect of the application of the software complex consists in reducing the time costs for calculating the parameters of the quality of separation by 5-7 times, increasing the accuracy of determining the critical modes of operation of the equipment, and promptly analyzing the impact of technological parameters on energy indicators. (Results and discussion) We proposed a digital product that implements the functions of an assistant for creating and maintaining a database to assess the effectiveness of modeling the parameters of an elevator with a potato harvester intensifier. (Conclusions) The work of the program was built in accordance with the requirements of modern legislation in the field of agriculture and ecology. We found that the proposed version of automated accounting is convenient and easy to use, applicable for installation on a smartphone, which saves time for a specialist who keeps records, thereby increasing labor productivity, as well as providing access to information at any time. In the future, the program can be improved and supplemented with the function of forming and submitting online reports to the reporting system of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation.

Keywords: digital modeling, parameter calculation, intensifier, elevator, soil separation, modeling effectiveness.

For citation: Gadzhiev I.P., Limarenko N.V., Uspenskiy I.A., Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G. Evaluation of the efficiency of modeling the parameters of an elevator with a potato harvester intensifier. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 73-80 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-73-80. EDN: WCKROV.

В условиях современного экономического развития сельского хозяйства автоматизация производственных процессов с применением цифровых продуктов для обеспечения национальной продовольственной безопасности страны – критически важный компонент [1, 2].

Одним из ключевых направлений развития сельскохозяйственной отрасли Российской Федерации служит переход на новую модель ведения сельского хозяйства *Agriculture 4.0*, предусматривающую внедрение передовых цифровых технологий во все направления аграрного сектора [3-5].

Цифровизация, моделирование элеватора с интенсификатором сепарации почвы дают возможность оценки потребляемой мощности сил транспортирования и сепарации пласта на картофелеуборочных комбайнах.

Специфические особенности работы картофелеуборочных машин – тяжелые реальные условия с непрерывно изменяющимися внешними воздействиями: значительное поступление клубненосной массы на рабочие органы при незначительном содержании в ней клубней. В среднем при клубненосной массе 250 кг/с количество клубней составляет 1,5-3%.

Количественный и качественный состав поступающей массы изменяется в широких пределах, что приводит к снижению производительности, увеличению повреждаемости клубней, который напрямую повлияет и на потери урожая.

Выбирая цифровой продукт, пользователи оценивают степень удобства работы с ним, безопасность персональных данных и эффективность от взаимодействия с сервисом [6]. Для пользователя важный аспект – простота интерфейса и возможность программы адаптироваться под разные устройства, в первую очередь мобильные (планшет, смартфон). Практика показывает потребность отрасли АПК в программных продуктах с перспективой бесшовной интеграции с другими сервисами, например, облачными хранилищами, социальными сетями, мессенджерами [7-9]. Все перечисленное делает разработку цифрового средства моделирования для оценки качества параметров основного элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна актуальной для практики и науки.

Цель исследования – оценить эффективность моделирования параметров элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна.

Материалы и методы. Известно, что внедрение в сельскохозяйственные уборочные машины цифровых средств моделирования технологических процессов способно повышать их производительность и качество работы, снижая затраты труда и потери урожая.

В настоящее время особую актуальность приобретают вопросы моделирования технологического процесса картофелеуборочной машины. Во время уборки нестабильность климатических условий часто вызывает неподходящие условия, что создает увеличение повреждаемости клубней.

С другой стороны, по некоторым данным до 30% рабочего времени комбайны простаивают из-за забивания рабочих органов на переувлажненных почвах вследствие перегрузок их технологической массой.

Изложенные факторы говорят о необходимости выведения к сепарирующим рабочим органам картофелеуборочной машины требования устойчивого протекания технологического процесса с достаточным качеством и оптимальной работой для комбайна.

Рассмотрели действия программы более подробно. Перед началом работы необходима предварительная количественная оценка мощности внешних сил, действующих на пласт клубней с примесями на полотне элеватора и ленте транспортера интенсификатора. Следует считать, что:

1) комбайн движется с постоянной скоростью по плоской горизонтальной поверхности;

2) величина скорости частицы почвенного пласта на полотне элеватора относительно комбайна во время движения и в момент схода с полотна элеватора постоянна и равна скорости точки прутка рабочей ветви;

3) движение пласта почвы с клубнями на полотне элеватора при постоянной подаче с лемеха считается установившимся, и масса клубненосного пласта на полотне элеватора постоянна.

Затраты энергии на транспортирование и сепарацию почвенного пласта на элеваторе с интенсификатором сепарации и соответствующая мощность P_1 распределяются на ходовую часть, привод элеватора и привод интенсификатора.

Пусть t – некоторый длительный промежуток времени установившегося движения комбайна с постоянной скоростью. За это время частицы подкопанного лемехом пласта массы M , поступившие на элеватор, приобретут некоторую скорость при сходе с элеватора и поднимутся на некоторую высоту. Очевидно, что:

$$M = M_1 + M_2,$$

где M_1 – масса частиц, поданных элеватором на следующий рабочий орган за время t ;

M_2 – масса отсепарированных на элеваторе частиц за время t .

В соответствии с принятыми обозначениями:

$$M_1 = [Q - Q_3(L)]t; M_2 = Q_3(L)t; M = Qt, \quad (1)$$

где Q – подача клубненосного почвенного пласта, подрезанного лемехом без учета ботвы, кг/с;

Q_3 – подача примесей, частицы которых отсепарированы на участке полотна перед данным сечением (зависит от x), кг/с.

За это время частицы пласта массы M_3 , отсепарированного на элеваторе и поступившего на ленту интенсификатора сепарации, обретут скорость v_1 при сходе с ленты на высоте H_1 .

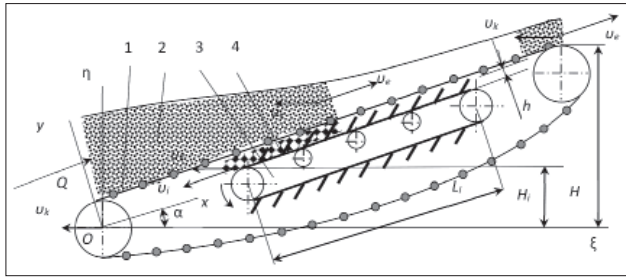


Рис. 1. К расчету мощности сил транспортирования и сепарации пласта на полотне элеватора с интенсификатором

Fig. 1. Calculating the power of the forces of transport and separation of the formation on the canvas of the elevator with an intensifier

На рис. 1 обозначено: 1 – полотно элеватора; 2 – пласт почвы с клубнями; 3 – интенсификатор; 4 – отделенная часть пласта на транспортере интенсификатора сепарации; v_e – скорость элеватора, м/с; L_i – длина ленты рабочей ветви транспортера интенсификатора, м; H_i – высота интенсификатора над поверхностью поля, м; h – расстояние между прутком и лентой резинового транспортера интенсификатора сепарации, м; α – угол наклона рабочей ветви полотна элеватора, °; v_k – скорость лемеха комбайна, м/с; v_e , v_i – величина скорости соответственно прутка и лопасти при поступательном движении относительно комбайна, м/с.

Примем, что масса M_3 частиц, попадающих на ленту интенсификатора, равна доле массы M_2 , прямо пропорциональной отношению длин интенсификатора L_i и элеватора L , то есть справедливо такое равенство:

$$M_3 = M_2 L_i / L \quad (2)$$

или с учетом выражения для:

$$M_2 = Q_3(L)t; \quad (3)$$

$$M_3 = Q_3(L)t L_i / L. \quad (4)$$

В системе координат $O\xi\eta$ теорему об изменении кинетической энергии частиц пласта массой M с учетом интенсификатора сепарации и аналогичных введенным ранее обозначениям работы сил запишем в таком виде:

$$\frac{M_3 v_3^2}{2} + \frac{(M - M_3) v_2^2}{2} - \frac{M v_1^2}{2} = A_1 + A_{2e} + A_{2i} + A_3 + A_4, \quad (5)$$

где v_3 – величина скорости частиц в неподвижной системе координат при сходе с ленты транспортера интенсификатора сепарации;

v_2 – величина скорости частиц в неподвижной

системе координат при сходе с полотна элеватора;

v_1 – величина скорости частицы пласта в неподвижной системе координат при входе на полотно элеватора;

A_1 , A_2 – работа сил тяжести, действующих на частицы соответственно отсепарированной и не отсепарированной частей пласта за промежутки времени движения их на полотне элеватора;

A_{2e} , A_{2i} – работа сил тяжести, действующих на частицы отсепарированной части пласта, не захваченные и захваченные интенсификатором сепарации, за промежутки времени движения их соответственно на элеваторе и на ленте интенсификатора;

A_3 – работа внешних сил, действующих на частицы пласта;

A_4 – работа внутренних сил, действующих на частицы пласта со стороны других частиц за промежутки времени движения их на полотне элеватора и на ленте интенсификатора.

После ряда математических преобразований получим мощность P_i , затрачиваемую на сепарацию почвы элеватора с интенсификатором вместе:

$$P_i = P_{i1} + P_{i2}, \quad (6)$$

где P_{i1} – мощность, затрачиваемая на движение отсепарированных и не отсепарированных частиц пласта на полотне элеватора, кВт,

$$P_{i1} = \frac{Q_3(L) L_i v_3^2}{2L} + \frac{[Q - Q_3(L) L_i / L] v_2^2}{2}, \quad (7)$$

P_{i2} – мощность, затрачиваемая на отсепарированные частицы пласта, захваченные интенсификатором, кВт,

$$P_{i2} = [Q - Q_3(L)] g H + \frac{g \sin \alpha [L Q_3(L) - \int_0^L Q_3 dx] (L - L_i)}{L} + \frac{Q_3(L) g H_i L_i}{L}. \quad (8)$$

Формула для приближенной оценки мощности P_i , полученная после подстановки в равенство (6) выражений (7), (8), с учетом также мощности P_{i3} имеет вид:

$$P_i = P_{i1} + P_{i2} + P_{i3}, \quad (9)$$

где P_{i3} – мощность, затрачиваемая на преодоление внешних сил, действующих на частицы пласта на элеваторе, кВт;

$$P_{i1} = \frac{(Q - p_2 v_e w) L_i v_3^2}{2L} + \frac{[QL - (Q - p_2 v_e w) L_i] v_2^2}{2L},$$

$$P_{i2} = p_2 v_e w g L \sin \alpha.$$

Вывод формулы для P_{i3} (Гаджиев И.П. Обоснование параметров сепарирующего элеватора картофелеуборочного комбайна: диссертация на соис-

кание ученой степени кандидата технических наук. Рязань, 2023. 128 с.):

$$P_{i3} = \frac{gp_2v_e w L \sin \alpha (\rho_0 h_0 + 4p_1 - 2p_2)(L - L_i)}{3L} + \frac{(Q - p_2 v_e w) g H_i L_i}{L}. \quad (10)$$

Авторы разработали программу, которая позволяет моделировать затраты энергии по полученным формулам на транспортирование и сепарацию почвенного пласта на элеваторе. Соответствующая мощность P распределяются на ходовую часть и привод элеватора.

Результатом работы программы стали автоматически создаваемый .xlsx файл базы данных. Согласно данным исследований, основными критериями эффективности, предложенного решения служат [10, 11]:

- масса подачи Q , кг/с;
- величина скорости полотна элеватора v_e , м/с;
- угол наклона элеватора α , °;
- длина ленты рабочей ветви транспортера интенсификатора L_i , м;
- расстояние между полотнами элеватора и интенсификатора h , м;
- высота интенсификатора над поверхностью поля H_i , м;
- удельная масса клубненосного пласта на единицу площади полотна элеватора p , кг/м².

Данная программа моделирования затрат энергии дает возможность количественно оценить, насколько использование микросервиса упрощает процесс расчета затрат энергетической мощности сил транспортирования и сепарации пласта на полотне элеватора с интенсификатором.

На *рисунке 2* представлен автоматический расчет мощности на основе вводимых пользователем технологических параметров и созданы наглядные графические модели, разработанные по техническому заданию в соответствии формулой (10).

Провели оценку эффективности моделирования параметров элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна по оценке качества сепарации клубненосной массы.

Результаты и обсуждение. В ходе исследования эффективности предложенной модели проанализировали три ключевых показателя:

- 1) мощность, затрачиваемая на движение отсепарированных и не отсепарированных частиц пласта на полотне элеватора;
- 2) мощность, затрачиваемая на отсепарированные частицы пласта, захваченные интенсификатором;
- 3) мощность, затрачиваемая на преодоление внешних сил, действующих на частицы пласта.

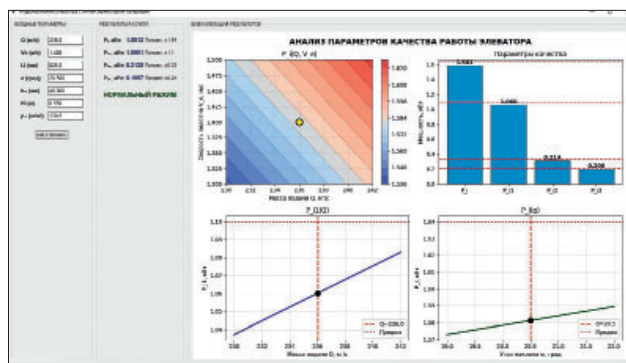


Рис. 2. Анализ параметров качества работы элеватора
Fig. 2. Analysis of the quality parameters of the elevator

Программа позволяет визуализировать технологический процесс работы элеватора с интенсификатором картофелеуборочного комбайна, оценить качество работы и определить его рациональные параметры.

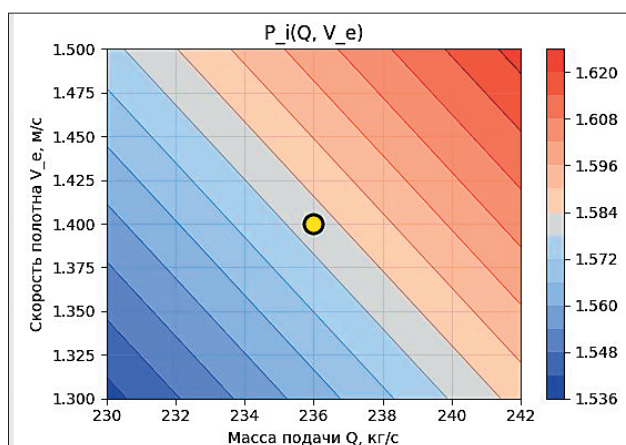


Рис. 3. Зависимость суммарной мощности P_i от скорости полотна элеватора v_e и массы подачи Q почвенно-клубненосной массы

Fig. 3. Dependence of the total power P_i on the speed of the elevator canvas v_e and the mass of the supply Q of the soil-tuberous mass клубень

Из анализа зависимости суммарной мощности P_i от скорости полотна элеватора v_e и подачи Q почвенно-клубненосной массы (*рис. 3*) определили рациональные значения скорости полотна элеватора $v_e = 1,4$ м/с и подачи почвенно-клубненосной массы $Q = 236$ кг/с.

Из анализа диаграмм оценки качества работы элеватора (*рис. 4*) видно, что больше затрат энергии $P_{i1} = 1,060$ кВт требуется на движение отсепарированных и не отсепарированных частиц пласта на полотне элеватора, а затраты на отсепарированные частицы пласта, захваченные интенсификатором $P_{i2} = 0,314$ кВт, и меньше всего мощность на преодоление внешних сил, действующих на частицы

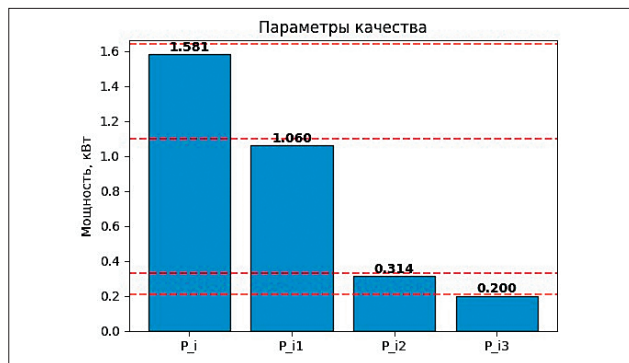


Рис. 4. Анализ параметров качества работы элеватора
Fig. 4. Analysis of the quality parameters of the elevator

пласта $P_{i3} = 0,200$ кВт. Зависимость мощности P_{i1} на движение отсепарированных и не отсепарированных частиц пласта на полотне элеватора от подачи Q почвенно-клубненосной массы показана на рисунке 5.

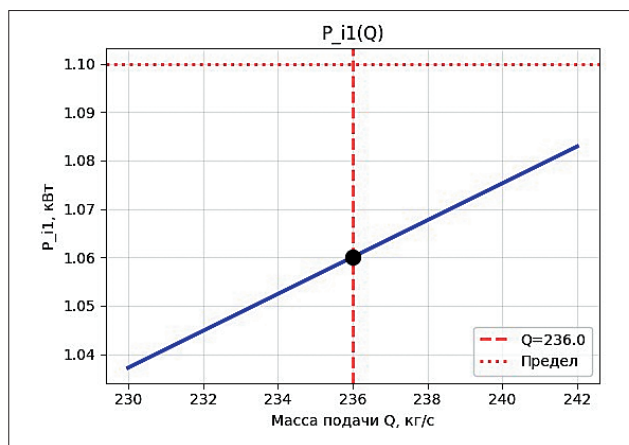


Рис. 5. Зависимость мощности P_{i1} на движение отсепарированных и не отсепарированных частиц пласта на полотне элеватора от подачи Q почвенно-клубненосной массы
Fig. 5. Dependence of the power P_{i1} on the movement of separated and unseparated particles of the formation on the elevator canvas from the supply Q of the soil-tuberous mass

При увеличении подачи Q почвенно-клубненосной массы на 4 кг/с затраты на движение отсепарированных и не отсепарированных частиц пласта на полотне элеватора увеличиваются на 1% (рис. 6) при неизменном значении угла наклона и скорости движения полотна элеватора.

Из анализа зависимости суммарной мощности P_i от угла α наклона элеватора определили рациональный угол наклона элеватора $\alpha = 20,5^\circ$.

Тестирование провели в сельскохозяйственном предприятии фермерское хозяйство «Радуга» Быкова В.Д., Курская область, Курский район, пос. Камыши.

Полученные данные позволяют сделать выводы об успешности внедрения системы и ее адаптивности

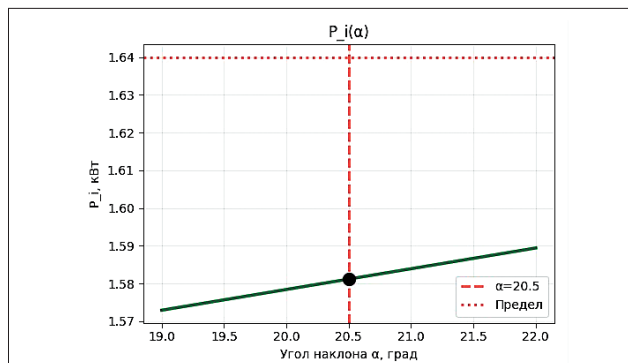


Рис. 6. Зависимость суммарной мощности P_i от угла α наклона элеватора
Fig. 6. Dependence of total power P_i on inclination angle α of the elevator

к различным условиям работы картофелеуборочных машин, в частности на переувлажненных почвах, где влажность выше 23%.

Выводы. Рассмотрели аспекты специфики создания цифровой модели для оптимизации процесса затрат мощности на сепарирующем элеваторе с интенсификатором картофелеуборочного комбайна КПК-2-01.

Предложенная цифровая модель предназначена для автоматизации процесса управления данными, анализа информации и принятия решений в этой области. Основные результаты исследования включают в себя описание разработанного решения, в ходе которого подробно рассмотрели архитектуру цифрового ассистента, в том числе используемые технологии и алгоритмы обработки сведений; указание преимуществ применения цифрового помощника с подчеркиванием таких преимуществ внедрения этого инструмента, как повышение эффективности энергосберегающих технических средств.

Практическая значимость и интуитивность применимости предложенного решения делают его привлекательным для внедрения на предприятиях, которые занимаются производством картофеля. Перспективы развития программы обозначены в виде возможности дальнейшего совершенствования продукта, включая интеграцию с другими цифровыми платформами, а также расширение функционала. Таким образом, создание цифровой модели для применения энергосберегающих технических средств служит важным шагом на пути к устойчивому развитию сельского хозяйства и улучшению эффективности производства картофеля. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку дополнительных модулей решения, а также на проведение масштабного тестирования в производственных условиях.

Библиографический список

- Александрова Н.Р., Субаева А.К., Чутчева Ю.В. Цифровизация сельского хозяйства: тенденции и перспективы развития // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2024. N2(52). С. 25-30. EDN: YYLRСY.
- Лепехина Ю.А., Грасс Е.Ю. Состояние, основные тренды и проблемы цифрового развития агропромышленного комплекса Российской Федерации // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. N10(148). DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.71. EDN: CDTKRV.
- Морковкин Д.Е., Остроумов В.В., Зозуля О.А. и др. Современные тенденции развития агропромышленного комплекса в условиях технологической модернизации и цифровой трансформации // *Вестник евразийской науки*. 2025. Т. 17. NS2. EDN: ILHDOA.
- Романова Л.В., Шашкова И.Г. Развитие агропромышленного комплекса в условиях цифровой экономики // *Фундаментальные исследования*. 2020. N11. С. 152-156. DOI: 10.17513/fr.42890. EDN: LCCNXW.
- Сибиряев А.С. Возможности использования цифровых платформ в сельском хозяйстве. Методический подход к процессу их внедрения // *Вестник НГИЭИ*. 2024. N7(158). С. 123-133. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-7-123-133. EDN: UZKWIL.
- Тарасенко Б.Ф., Букарев А.А., Хавьяримана Э. и др. Цифровые технологии и их влияние на механизацию сельского хозяйства // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. N1. С. 88-96. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-1-88-96. EDN: QUSAAE.
- Костомахин М.Н., Саяпин А.С., Пестряков Е.В. и др. Совершенствование подходов к диагностированию для управления надежностью сельскохозяйственной техники // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N1(54). С. 57-64. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-57-64. EDN: ZVFFYO.
- Koul B., Yakoob M., Shah M.P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*. 2022. Vol. 206. 112285. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112285. EDN: KXILJW.
- Ковзунова Е.С., Руйга И.Р., Жирнова И.С. и др. Цифровые сервисы в агропромышленном комплексе: контент-анализ функциональных возможностей, проблемы и перспективы развития // *Продовольственная политика и безопасность*. 2024. Т. 11. N2. С. 265-286. DOI: 10.18334/ppib.11.2.120784. EDN: AMLHFI.
- Корабошев О.З. Цифровые технологии в сельском хозяйстве // *Вестник науки и образования*. 2021. N11-2(114). С. 65-68. EDN: FSQSEZ.
- Линьков Ю.В., Моторин О.А., Парфентьев М.В. Подходы к классификации цифровых сервисов для АПК и развитие интегрированных решений с учетом геосервисов // *Управление рисками в АПК*. 2021. N1(39). С. 82-91. DOI: 10.53988/24136573-2021-01-07. EDN: CWYVTU.

References

- Aleksandrova N.R., Subaeva A.K., Chutcheva Yu.V. Digitalization of agriculture: trends and prospects of development. *Natural Science and Humanities Research*. 2024. N2(52). 25-30 (In Russian). EDN: YYLRСY.
- Lepekhina Y.A., Grass Y.Y. State, main trends and problems of digital development of the agro-industrial complex of the Russian Federation. *International Research Journal*. 2024. N10(148) (In Russian). DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.71. EDN: CDTKRV.
- Morkovkin D.E., Ostroumov V.V., Zozulya O.A., et al. Current trends in the development of the agro-industrial complex in the context of technological modernization and digital transformation. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025. Vol. 17. NS2 (In Russian). EDN: ILHDOA.
- Romanova L.V., Shashkova I.G. Development of the agro-industrial complex in the digital economy. *Fundamental Research*. 2020. N11. 152-156 (In Russian). DOI: 10.17513/fr.42890. EDN: LCCNXW.
- Sibiryaev A.S. Possibilities of using digital platforms in agriculture. Methodological approach to the process of their implementation. *Bulletin NGIEI*. 2024. N7(158). 123-133 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2024-7-123-133. EDN: UZKWIL.
- Tarasenko B.F., Bukarev A.A., Havyarimana E. et al. Digital technologies and their impact on agricultural mechanization. *Electrical Engineering and Equipment in The Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N1. 88-96 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-1-88-96. EDN: QUSAAE.
- Kostomakhin M.N., Sayapin A.S., Pestryakov E.V., et al. Improvement of diagnostic approaches for reliability management of agricultural machinery. *Electrical Engineering and Equipment in The Agro-Industrial Complex*. 2024. Vol. 71. N1(54). 57-64 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-57-64. EDN: ZVFFYO.
- Koul B., Yakoob M., Shah M.P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*. 2022. Vol. 206. 112285. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112285. EDN: KXILJW.

9. Kovzunova E.S., Ruyga I.R., Zhirnova I.S., et al. Digital services in the agro-industrial complex: content analysis of functionality, problems and development perspectives. *Food Policy and Security*. 2024. Vol. 11. N2. 265-286 (In Russian). DOI: 10.18334/ppib.11.2.120784. EDN: AMLHFI.
10. Koraboshev O.Z. Innovations and modern technologies in agriculture. *Bulletin of Science and Education*. 2021. N11-2(114). 65-68 (In Russian). EDN: FSQSEZ.
11. Linkov Yu.V., Motorin O.A., Parfentev M.V. Approaches to the classification of digital services for AIC and the development of integrated solutions taking into account geoservices. *Agricultural Risk Management*. 2021. N1(39). 82-91 (In Russian). DOI: 10.53988/24136573-2021-01-07. EDN: CWYVTU.

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 29.06.2026

Статья принята к публикации 03.09.2026



Математическая модель движения роботизированной платформы для дезинфекции животноводческих помещений

Леонид Николаевич Прокопьев,

аспирант, e-mail: leonid_prokopen_2000@mail.ru;

Петр Леонидович Лекомцев,

доктор технических наук, профессор

Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск, Российская Федерация

Реферат. Высокая плотность содержания поголовья создает благоприятные условия для распространения патогенной микрофлоры, что становится причиной снижения продуктивности сельскохозяйственных животных на 15-20 процентов. В настоящее время традиционные стационарные системы санитарной обработки экономически нецелесообразны, в связи с этим в качестве эффективной альтернативы предлагаются мобильные роботизированные комплексы, генерирующие и равномерно распределяющие электроаэрозоли. (Цель исследования) Разработка математической модели движения роботизированной дезинфекционной платформы с учётом динамики разряда аккумуляторной батареи. (Материалы и методы) Модель построена на основе электромеханических уравнений тягового привода. Взаимосвязь электрических и механических параметров описывается без учёта индуктивности обмотки, через сопротивление, ток, константу противо-ЭДС и угловую скорость. Сила тяги на колёсах выражена через постоянную момента двигателя, радиус колеса и передаточное число редуктора. Ключевая особенность модели – интеграция обобщённого уравнения Пейкертта, описывающего процесс разряда аккумулятора, с уравнением движения робота. Напряжение батареи представлено в виде линейной аппроксимации в рабочем диапазоне. В результате получена система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. (Результаты и обсуждение) Испытания и расчёты показали, что платформа выходит на рабочую скорость 0,13-0,15 метров в секунду за 2-3 минуты, после чего режим стабилизируется. Известно, что наибольшую устойчивость и скорость обеспечивают литий-железо-фосфатные батареи (LiFePO₄), тогда как литий-ионные (Li-ion) демонстрируют несколько сниженные показатели. По мере продвижения платформы напряжение плавно снижается, что вызывает незначительное уменьшение скорости. При преодолении дистанции 80 метров падение напряжения не превышает 11-12 процентов, что подтверждает техническую достаточность выбранной ёмкости для полного цикла работы. (Выводы) Внедрение автономных роботизированных комплексов способствует рационализации технологических процессов, повышает коэффициент использования дезинфицирующих препаратов, минимизирует биологические риски для персонала и поголовья, а также создаёт условия для устойчивого развития отрасли. Разработанная модель подтверждает, что аккумулятор ёмкостью 2 Ампер-часа полностью покрывает энергетические потребности платформы.

Ключевые слова: роботизированная платформа, математическая модель, электроаэрозоль, дезинфекция животноводческих помещений, аккумуляторная батарея.

Для цитирования: Прокопьев Л.Н., Лекомцев П.Л. Математическая модель движения роботизированной платформы для дезинфекции животноводческих помещений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 81-86. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-81-86. EDN: ZCEUBC.

Scientific article

Mathematical Model of the Movement of a Robotic Platform for Disinfection of Livestock Facilities

Leonid N. Prokopenv,

postgraduate, e-mail: leonid_prokopen_2000@mail.ru;

Petr L. Lekomtsev,
Dr.Sc.(Eng.), professor

Udmurt State Agrarian University, Izhevsk, Russian Federation

Abstract. *The high density of livestock content creates favorable conditions for the spread of pathogenic microflora, which causes a decrease in the productivity of farm animals by 15-20 percent. Currently, traditional stationary sanitary treatment systems are economically impractical, in this regard, mobile robotic complexes that generate and evenly distribute electroaerosols are offered as an effective alternative. (Research Purpose) The research purpose is developing a mathematical model of the movement of a robotic disinfection platform taking into account the dynamics of the battery discharge. (Materials and methods) The model is based on electromechanical equations of traction drive. The relationship between electrical and mechanical parameters is described without taking into account the inductance of the winding, through resistance, current, counter-EMF constant and angular velocity. The traction force on the wheels is expressed through the constant torque of the engine, the radius of the wheel and the gear ratio of the gearbox. A key feature of the model is the integration of the generalized Paykert equation describing the process of battery discharge with the robot's equation of motion. The battery voltage is represented as a linear approximation in the operating range. The result is a system of nonlinear ordinary differential equations. (Results and discussion) Tests and calculations showed that the platform reaches an operating speed of 0.13-0.15 meters per second in 2-3 minutes, after which the mode stabilizes. It is known that the greatest stability and speed are provided by lithium-iron-phosphate batteries (LiFePO₄), while lithium-ion (Li-ion) show slightly reduced rates. As the platform moves, the voltage gradually decreases, which causes a slight decrease in speed. When overcoming the distance of 80 meters, the voltage drop does not exceed 11-12 percent, which confirms the technical sufficiency of the selected capacity for a full processing cycle. (Conclusions) The introduction of autonomous robotic systems contributes to the rationalization of technological processes, increases the utilization rate of disinfectants, minimizes biological risks for personnel and livestock, and creates conditions for sustainable development of the industry. The developed model confirms that the 2 Amp-hour battery fully covers the energy needs of the platform.*

Keywords: *robotic platform, mathematical model, electroaerosol, disinfection of livestock facilities, and rechargeable battery.*

For citation: Prokopyev L.N., Lekomtsev P.L. Mathematical model of the movement of a robotic platform for disinfection of livestock facilities. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 81-86 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-81-86. EDN: ZCEUBC.

Устойчивое развитие сельскохозяйственного производства – ключевой фактор стратегии обеспечения продовольственной безопасности страны [1]. Дальнейший рост производства и получение высококачественной продукции возможны при использовании новых высокоинтенсивных методов в животноводстве и растениеводстве [2].

Высокий уровень концентрации производства на небольшом пространстве территории создает условия, способствующие распространению патогенов и различных вредителей. Попадая в воздух, микроорганизмы образуют большое количество аэропланктона, который может распространяться по производственным корпусам, оседать на поверхностях построек и телах животных, попадать в их

дыхательные пути [3]. Это приводит к массовым инфекционным заболеваниям, а патогены при постоянном воздействии снижают продуктивность животных на 15-20% [1].

В связи с этим необходимо уделять повышенное внимание модернизации подходов к санитарной обработке воздуха и внутренних помещений для скота, не забывая о регулярной лечебно-профилактической обработке животных.

В настоящее время перспективным направлением ветеринарно-санитарной обработки является применение заряженных аэрозолей (электроаэрозолей) на основе дезинфицирующих и лекарственных средств, использование которых оказывает комплексный эффект: усиливает дезинфекцию, дезинсекцию и дезодорацию помещений и транспортных средств.

Кроме этого, электроаэрозольные установки обеспечивают возможность групповой вакцинации поголовья, очистки воздуха от пыли и поддержания оптимальной влажности в животноводческих комплексах [2].

В то же время важнейшей задачей является генерация и равномерное распространение электроаэрозолей в помещении, однако использование стационарных генераторов в крупных животноводческих помещениях нерентабельно из-за необходимости устанавливать значительное количество генераторов.

На текущий момент наиболее перспективны мобильные, роботизированные комплексы, которые, перемещаясь по помещению, генерируют электроаэрозоль и равномерно заполняют помещение дезинфицирующими препаратами [4-7].

Цель исследования – разработать математическую модель движения роботизированной платформы для дезинфекции животноводческих помещений с учетом величины заряда аккумулятора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать алгоритм движения роботизированной платформы;
- изучить влияние объема заряда аккумулятора на динамику движения платформы.

Материалы и методы. Составим уравнение движения роботизированной платформы [8, 9] (рис.1).

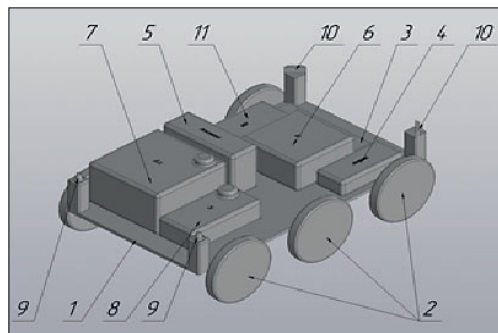


Рис. 1. 3D-модель роботизированной платформы для дезинфекции электроаэрозолем: 1 – корпус; 2 – ведущие колеса; 3 – аккумулятор; 4 – инвертор; 5 – компрессор; 6 – блок управления; 7 – емкость для дезинфицирующего раствора; 8 – емкость омывающей жидкости; 9 – аэрозольные пневматические форсунки; 10 – ультразвуковые датчики; 11 – высоковольтный источник питания

Fig. 1. 3D model of a robotic platform for disinfection using electroaerosol: 1 – body; 2 – drive wheels; 3 – battery; 4 – inverter; 5 – compressor; 6 – control unit; 7 – container for disinfectant solution; 8 – container for washing fluid; 9 – aerosol pneumatic nozzles; 10 – ultrasonic sensors; 11 – high voltage power source

Взаимосвязь между электрической и механической составляющими электропривода (без учета индуктивности обмотки) описывается выражением [10]

$$U(q) = RI + K_e \omega, \quad (1)$$

где R – сопротивление обмотки двигателя, Ом; I – ток двигателя, А;

K_e – константа противо-ЭДС, (В·с/рад); ω – угловая скорость вращения вала двигателя, с^{-1} .

Отсюда ток двигателя с учетом, что $\omega = \frac{i}{r} v$ равен

$$I = \frac{U(q) - K_e \frac{i}{r} v}{R}, \quad (2)$$

где v – скорость движения, м/с.

Тогда уравнение движения робота можно описать уравнением

$$m \frac{dv}{dt} = F_{\text{тяг}} - F_{\text{сопр}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{тяг}}$ – сила тяги на колесах, Н; $F_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления, Н.

Сила тяги на колесах равна

$$F_{\text{тяг}} = \frac{K_t I}{r} \cdot \frac{1}{i}, \quad (4)$$

где K_t – постоянная момента двигателя, Н·м/А; r – радиус колеса, м; i – передаточное число редуктора.

При движении колесного робота при небольшой скорости по горизонтальной поверхности наибольшей силой сопротивления является сила сопротивления качению

$$F_{\text{сопр}} = \mu \cdot m \cdot g, \quad (5)$$

где μ – коэффициент сопротивления качению, Н; m – масса робота, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Подставив в уравнение (3) выражения (4) и (5) с учетом значения тока (2) и приравняв $K_t = K_e$, получим

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{K_e \cdot i}{r} \cdot \frac{U - K_e \cdot v \cdot i / r}{R} \cdot v - \mu \cdot m \cdot g. \quad (6)$$

Выполнив преобразования, получим

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K_e \cdot i \cdot U}{m \cdot r \cdot R} - \frac{K_e^2 \cdot i^2}{m \cdot r^2 \cdot R} \cdot v - \mu \cdot g. \quad (7)$$

Уравнение разряда аккумулятора выражается эффектом Пейкerta [11-14].

$$\frac{dq}{dt} = -I^n \cdot C^{1-n}, \quad (8)$$

где C – номинальная емкость аккумулятора, А·ч; n – экспонента Пейкerta.

С учетом величины тока (2) получим

$$\frac{dq}{dt} = - \left(\frac{U - K_e \cdot v \cdot i / r}{R} \right)^n \cdot C^{1-n}. \quad (9)$$

Зависимость напряжения на конденсаторе вы-

разится через линейную аппроксимацию в рабочем диапазоне

$$U(q) = U_0 + k_q \cdot Q. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (7) и (9), получим систему дифференциальных уравнений, описывающих движение роботизированной платформы с учетом изменения заряда аккумулятора

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{K_e \cdot i \cdot (U_0 - k_q \cdot Q)}{m \cdot r \cdot R} - \frac{K_e^2 \cdot i^2}{m \cdot r^2 \cdot R} \cdot v - \mu \cdot g \\ \frac{dq}{dt} = - \left(\frac{U_0 - k_q \cdot Q - K_e \cdot v \cdot i / r}{R} \right)^n \cdot C^{1-n} \end{cases} \quad (11)$$

Первое уравнение системы описывает изменение скорости робота под действием силы тяги, сопротивления и падающего напряжения, а второе – описывает изменение заряда аккумулятора в зависимости от тока, который в свою очередь зависит от скорости и напряжения [15].

Результаты и обсуждение. Решение системы дифференциальных уравнений представлено в виде графиков (рис. 2-3).

На рисунке 2 представлены зависимости скорости движения платформы от времени при использовании аккумуляторов разного типа (для расчетов использована емкость аккумулятора 2 А·ч).

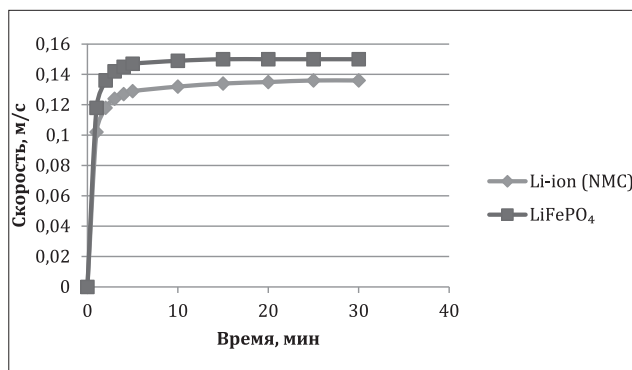


Рис. 2. Зависимости скорости движения платформы от времени при использовании аккумулятора

Fig. 2. Dependence of the platform's movement speed on time

Из рисунка 2 видно, что скорость движения платформы быстро растет в течение 2-3 минут, достигая 0,13-0,15 м/с. При этом более высокая скорость достигается с аккумулятором LiFePO₄, а меньшую – обеспечивает аккумулятор Li-ion.

В дальнейшем – по мере продвижения роботизированной платформы – скорость незначительно уменьшается. Это связано с постепенным снижением напряжения на аккумуляторе с течением времени (рис. 3), что обусловлено естественным саморазрядом.

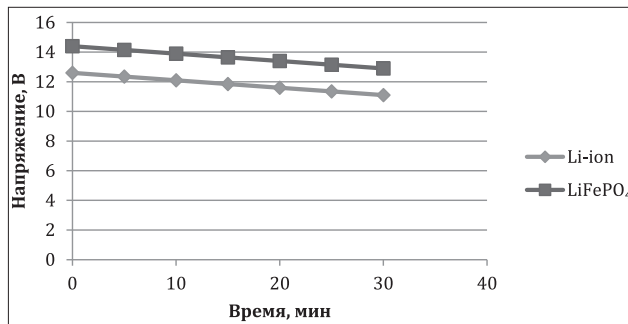


Рис. 3. Снижение напряжения аккумуляторов от времени работы

Fig. 3. Voltage drop as a function of operating time

Таким образом, по мере продвижения платформы к концу животноводческого помещения длиной 80 м напряжение на аккумуляторах уменьшается на 11-12%.

Выводы. Внедрение роботизированных комплексов для санитарной обработки животноводческих объектов способствует рационализации технологических процессов, повышает коэффициент использования дезинфицирующих препаратов, минимизирует биологические риски для поголовья и персонала, а также создает условия для экологически устойчивого развития отрасли.

Моделирование динамики роботизированной платформы выявляет, что применение аккумулятора емкостью 2 А·ч достаточно для полного выполнения цикла дезинфекции животноводческого помещения. Заряд аккумулятора при этом снижается не более чем на 11-12%.

Библиографический список

1. Сивков Г.С., Левченко М.А. Дезинфекция животноводческих помещений // *Ветеринария*. 2010. N4. С. 40-42. EDN: LGKGRT.
2. Буреев И.А. Новые технические средства для применения аэрозолей в ветеринарии // *Ветеринария*. 2008. N10. С. 45-46. EDN: JWCYMP.
3. Мальцева Б.М. Состояние и перспективы научных исследований по актуальным проблемам ветеринарной медицины // *Ветеринария*. 2001. N3. С. 663. EDN: ECQXVB.
4. Прокопьев Л.Н., Лекомцев П.Л., Прокопьева В.А. Роботизированная платформа для проведения дезинфекции животноводческих помещений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. N1(58). С. 68-72. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-1-68-72. EDN: XVXDCL.
5. Поспелова И.Г., Возмищев И.В., Шувалова И.В. и др. Роботизация процессов в сфере агропромышлен-

- ного комплекса на примере обеззараживания поверхностей ИК-излучением // *АгроЭкоИнфо*. 2024. N1(61). DOI: 10.51419/202141122. EDN: LJPSPI.
6. Загазежева О.З., Бербекова М.М. Основные тренды развития роботизированных технологий в сельском хозяйстве // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2021. N5(103). С. 11-20. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-5-103-11-20. EDN: CVVUNG.
7. Пospelова И.Г., Дородов П.В., Возмищев И.В. и др. Разработка энерго- и ресурсосберегающих установок для обеззараживания почвосмеси ИК-излучением // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. N3(60). С. 46-53. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-46-53. EDN: NTUTXT.
8. Юферев Л.Ю., Споров А.П. Конструкция и компоновка электрического мобильного транспортного средства для фермерского хозяйства // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69. N3(48). С. 89-94. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-3-89-94. EDN: GEPWPU.
9. Карпов М.А., Лавров А.В., Сидоров М.В. и др. Транспортно-технологический модуль с электроприводом колес // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70. N3(52). С. 103-108. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-3-103-108. EDN: BJCVSX.
10. Садовец Р.В., Резанова Е.В., Садовец В.Ю. Разработка электромеханического привода мобильного наземного робототехнического комплекса с дистанционным управлением // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2025. N6(172). С. 5-18. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-5-18. EDN: DWDMTG.
11. Язвинская Н.Н., Галушкин Д.Н., Галушкин Н.Е. и др. Использование обобщенного уравнения Пейкerta при больших токах разряда в электрохимических аккумуляторах // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2020. N2(206). С. 72-78. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-2-72-78. EDN: OKJLBR.
12. Язвинская Н.Н., Галушкин Д.Н., Галушкин Н.Е. Обобщение уравнения Пейкerta для построения практических моделей аккумуляторов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2019. N2(202). С. 60-68. DOI: 10.17213/0321-2653-2019-2-60-68. EDN: LNLHLM.
13. Доброго К.В., Бладыко Ю.В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2021. Т. 64. N1. С. 27-39. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39. EDN: EELLMF.
14. Язвинская Н.Н., Липкин М.С., Галушкин Д.Н. и др. Использование обобщенных уравнений Пейкerta для оценки отдаваемой электрохимическими аккумуляторами емкости // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2023. N3(219). С. 65-73. DOI: 10.17213/1560-3644-2023-3-65-73. EDN: DDMXNQ.
15. Юферев Л.Ю., Споров А.П. Методика расчета выбора аккумуляторных батарей для мобильного транспортного средства с электроприводом // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70. N3(52). С. 109-114. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-3-109-114. EDN: UZFZXA.

References

1. Sivkov G.S., Levchenko M.A. Disinfection of cattle-breeding premises. *Veterinary Medicine*. 2010. N4. 40-42 (In Russian). EDN: LGKGRT.
2. Bureev I.A. New technical tools for application of aerosols in veterinary practice. *Veterinary Medicine*. 2008. N10. 45-46 (In Russian). EDN: JWCYMP.
3. Maltseva B.M. Current state and prospects of scientific research on topical problems of veterinary medicine. *Veterinary Medicine. Abstract Journal*. 2001. N3. 663 (In Russian). EDN: ECQXVB.
4. Prokopyev L.N., Lekomtsev P.L., Prokopyeva V.A. Robotic platform for disinfection of livestock premises. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2025. Vol. 72. N1(58). 68-72 (In Russian). DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-1-68-72. EDN: XVXDCL.
5. Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Shuvalova I.V. et al. Robotization of processes in the field of agro-industrial complex on the example of disinfection of surfaces with infrared radiation. *AgroEcoInfo*. 2024. N1(61) (In Russian). DOI: 10.51419/202141122. EDN: LJPSPI.
6. Zagazezheva O.Z., Berbekova M.M. The main trends in the development of robotic technologies in agriculture. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021. N5(103). 11-20 (In Russian). DOI: 10.35330/1991-6639-2021-5-103-11-20. EDN: CVVUNG.
7. Pospelova I.G., Dorodov P.V., Vozmishchev I.V. et al. Development of energy-saving installations for disinfection of soil mixtures with IR radiation. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2025. Vol. 72. N3(60). 46-53 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-46-53. EDN: NTUTXT.
8. Yuferev L.Yu., Sporov A.P. Design and layout of an

- electric mobile vehicle for farming. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2022. Vol. 69. N3(48). 89-94 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-3-89-94. EDN: GEPWPU.
9. Karpov M.A., Lavrov A.V., Sidorov M.V. et al. Transport and technological module with electric wheel drive. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023. Vol. 70. N3(52). 103-108 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-3-103-108. EDN: BJCVCX.
 10. Sadovets R.V., Rezanova E.V., Sadovets V.Yu. Development of an electromechanical drive mobile ground-based robotics complex with remote control. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025. N6(172). 5-18 (In Russian). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-5-18. EDN: DWDMTG.
 11. Yazvinskaya N.N., Galushkin D.N., Galushkin N.E. et al. Using the generalized Peukert equation at high discharge currents for nickel-cadmium batteries. *Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2020. N2(206). 72-78 (In Russian). DOI: 10.17213/1560-3644-2020-2-72-78. EDN: OKJLBR.
 12. Yazvinskaya N.N., Galushkin D.N., Galushkin N.E. Generalization of Peukert's equation to build practical models of batteries. *Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2019. N2(202). 60-68 (In Russian). DOI: 10.17213/0321-2653-2019-2-60-68. EDN: LNLHLM.
 13. Dobrego K.V., Bladyko Yu.V. Modeling of batteries and their assemblies taking into account the degradation of parameters. Power engineering. *Proceedings of Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations of the CIS*. 2021. Vol. 64. N1. 27-39 (In Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39. EDN: EELLMF.
 14. Yazvinskaya N.N., Lipkin M.S., Galushkin D.N. et al. The use of generalized Peikert equations for the evaluation of electrochemical capacity batteries. *Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2023. N3(219). 65-73 (In Russian). DOI: 10.17213/1560-3644-2023-3-65-73. EDN: DDMXNQ.
 15. Yuferev L.Yu., Sporov A.P. Choice of batteries for an electric mobile vehicle. *Electrical Technologies and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023. Vol. 70. N3(52). 109-114 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-3-109-114. EDN: UZFZXA.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Прокопьев Л.Н. – подготовка начального варианта статьи, обработка материалов;

Лекомцев П.Л. – общее руководство проектом, редактирование текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Prokopyev L.N. – preparation of the initial manuscript, processing of materials;

Lekomtsev P.L. – general project management, editing of the text.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 29.06.2026

Статья принята к публикации 15.09.2026

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Моделирование и изготовление мобильного концентраторного теплофотозлектрического модуля с двусторонним фотоприемником

Владимир Анатольевич Панченко¹,

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

Сергей Павлович Чирский²,

кандидат технических наук, доцент

¹Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация;

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Реферат. Комбинация солнечного коллектора и фотозлектрического модуля имеет ряд положительных преимуществ при объединении этих двух устройств в одно комбинированное. В подобногo рода устройстве происходит охлаждение фотозлектрических преобразователей, что увеличивает их электрическую эффективность. Отводимое тепло повышает общую эффективность такого комбинированного модуля. Рассматриваются моделирование и изготовление складного солнечного теплофотозлектрического модуля концентраторной конструкции с двусторонним фотоприемником. (Цель исследования) Создать трехмерную модель теплофотозлектрического модуля с двусторонним фотоприемником в системе автоматизированного проектирования, смоделировать тепловой режим работы разработанной модели в системе конечно-элементного анализа и изготовить разработанный теплофотозлектрический модуль. (Материалы и методы) Применили основные инструменты исследования – систему автоматизированного проектирования (Компас 3D) и систему конечно-элементного анализа (Ansys). Изготовили компоненты модуля с помощью быстрого прототипирования с использованием послойной печати полимерным материалом, герметизацию фотозлектрических преобразователей выполнили посредством двухкомпонентного полисилоксанового компаунда. (Результаты и обсуждение) Разработали трехмерную модель складного солнечного теплофотозлектрического модуля концентраторной конструкции с двусторонним фотоприемником; тепловое состояние, скорости теплоносителя и его линии течения визуализировали и проанализировали, после чего изготовили прототип разработанного складного солнечного теплофотозлектрического модуля. (Выводы) Показали, что разработанный складной солнечный теплофотозлектрический модуль концентраторной конструкции с двусторонним фотоприемником позволяет производить автономное и мобильное энергоснабжение потребителей вдали от централизованных сетей. Установили, что использование концентратора солнечного излучения и одновременно двух рабочих сторон фотозлектрических преобразователей дает возможность экономить кремний высокой степени очистки, а двустороннее охлаждение фотозлектрических преобразователей обеспечивает более качественное их охлаждение и получение на выходе тепловой энергии в виде нагретого теплоносителя (воды).

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, система конечно-элементного анализа, трехмерная модель, Компас 3D, Ansys, прототипирование, концентратор солнечного излучения, двусторонние фотозлектрические преобразователи, солнечный теплофотозлектрический модуль.

Для цитирования: Панченко В.А., Чирский С.П. Моделирование и изготовление мобильного концентраторного теплофотозлектрического модуля с двусторонним фотоприемником // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2026. Т. 73. №3. С. 87-95. DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-87-95. EDN: XPRSBK.

Modeling and Manufacturing of a Mobile Concentrator Photovoltaic Thermal Module with a Two-Side Photoreceiver

Vladimir A. Panchenko¹,

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

Sergey P. Chirskiy²,

Ph.D.(Eng.), associate professor

¹Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation;

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The combination of a solar collector and a photovoltaic module has a number of positive advantages when combining these two devices into one combined unit. In such a device, photovoltaic converters are cooled, which increases their electrical efficiency. The heat removed increases the overall efficiency of such a combined module. The modeling and manufacture of a folding solar thermal photovoltaic concentrator design module with a bilateral photodetector is considered. (Research purpose) The research purpose is creation of a three-dimensional model of a thermal photovoltaic module with a two-side photoreceiver in a computer-aided design system, simulating the thermal mode of operation of the developed model in a finite element analysis system and manufacturing the developed thermal photovoltaic module. (Materials and methods) The main research tools were used is the computer-aided design system (Compass 3D) and the finite element analysis system (Ansys). The components of the module were manufactured using rapid prototyping using layer-by-layer printing with a polymeric material, sealing of photoelectric converters was performed by two-component polysiloxane compound. (Results and discussion) A three-dimensional model of a folding solar thermal photovoltaic module of a concentrator design with a two-side photoreceiver was developed; the thermal state, the speed of the coolant and its flow lines were visualized and analyzed, after which a prototype of a folding solar thermal photovoltaic module was manufactured. (Conclusions) It was shown that the developed foldable solar thermal photovoltaic concentrator design module with a two-side photoreceiver allows to produce autonomous and mobile power supply to consumers away from centralized grids. It was established that the use of a solar radiation concentrator and at the same time two working sides of photovoltaic converters makes it possible to save silicon of a high purity, and two-side cooling of photovoltaic converters provides better cooling and obtaining thermal energy at the output in the form of a heated coolant (water).*

Keywords: *computer-aided design system, finite element analysis system, three-dimensional model, Kompas 3D, Ansys, prototyping, solar concentrator, two-side photovoltaic converters, solar photovoltaic thermal module.*

For citation: Panchenko V.A., Chirskiy S.P. Modeling and manufacturing of a mobile concentrator photovoltaic thermal module with a two-side photoreceiver. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2026. Vol. 73. N3. 87-95 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2026-73-3-87-95. EDN: XPRSBK.

Комбинация солнечного коллектора и фотоэлектрического модуля имеет ряд положительных преимуществ при объединении этих двух устройств в одно комбинированное [1] (Kharchenko V., Panchenko V., Tikhonov P., Vasant P. Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply. Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. 2018. 86-119. DOI:

10.4018/978-1-5225-3867-7.ch004; Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Panchenko V. and Vasant P. Evaluation of the Silicon Solar Cell Modules. *Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 866. 328-336. DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_34). В подобного рода устройстве происходит охлаждение фотоэлектрических преобразователей, что увеличивает их электрическую эффективность. Отводимое тепло по-

вышает общую эффективность такого комбинированного модуля [2-5] (Rawat P., Debbarma M., Mehrotra S. et al. Design, development and experimental investigation of solar photovoltaic/thermal (PV/T) water collector system. International Journal of Science, Environmental Technology. 2014. Vol. 3. N3. 1173-1183). В случае применения концентраторов солнечного излучения отмечается экономия фотоэлектрических преобразователей, а также нагрев до более высоких температур теплоносителя. Использование двусторонних фотоэлектрических преобразователей экономит их количество, что положительно сказывается на стоимости концентраторных теплофотоэлектрических модулей с двусторонними фотоприемниками.

Поиск оптимальной конструкции данных модулей – актуальная задача, так как при перегреве теплоносителя (увеличении температуры на выходе модуля) наблюдается уменьшение электрической эффективности фотоэлектрических преобразователей. В работах по рассматриваемой тематике описаны различные математические модели тепловых состояний теплофотоэлектрических модулей [6-9]. Однако большой интерес представляет трехмерное исследование разрабатываемых модулей с возможностью визуального анализа различных режимов работы теплофотоэлектрических модулей. Необходимо целостное представление о процессах, происходящих в таких сложных с конструктивной точки зрения модулях, полученное с помощью визуализации тепловых полей, скоростей теплоносителя и линий его течения, что позволит полноценно анализировать предложенные расчеты и конструкции модулей. Причем изготовление теплофотоэлектрических модулей – отдельная задача для исследований, которая усложняется при проектировании концентраторных теплофотоэлектрических модулей с лицевым охлаждением двусторонних фотоэлектрических преобразователей.

Цель исследования – создать трехмерную модель теплофотоэлектрического модуля с двусторонним фотоприемником в системе автоматизированного проектирования, смоделировать тепловой режим работы разработанной модели в системе конечно-элементного анализа и изготовить разработанный теплофотоэлектрический модуль.

Материалы и методы. Основные инструменты исследования – система автоматизированного проектирования (Компас-3D) и система конечно-элементного анализа (Ansys). Изготовили компоненты модуля с помощью послойной печати полимерным материалом, герметизацию фотоэлектрических пре-

образователей выполнили с применением двухкомпонентного полисилоксанового компаунда.

Трехмерная модель мобильного концентраторного теплофотоэлектрического модуля с двусторонним фотоприемником

В результате моделирования в системах автоматизированного проектирования и конечно-элементного анализа разработали модель солнечного теплофотоэлектрического модуля, который служит для получения электроэнергии и тепла для мобильного энергоснабжения стоянок сельскохозяйственных животных с возможностью установки нескольких фотоприемников и регулировкой их освещенности с помощью профиля концентратора. Таким образом повышается эффективность использования солнечной энергии в складном мобильном модуле, сокращается себестоимость получения электрической энергии и теплоты за счет того, что наряду с генерацией электричества с применением фотоэлектрических преобразователей потребитель также получает тепловую энергию путем охлаждения фотоэлементов, использование концентратора снижает количество необходимых фотоэлементов. На *рисунке 1а* показана трехмерная модель складного теплофотоэлектрического концентраторного модуля с двусторонними фотоэлектрическими преобразователями в разложенном (рабочем) состоянии. На *рисунке 1б* представлен чертеж поперечного разреза двустороннего фотоприемника складного теплофотоэлектрического концентраторного модуля с двусторонними фотоэлектрическими преобразователями.

Из транспортировочного положения модуля концентратор солнечного излучения 1 с помощью шарнирных устройств 2 и 3 раскладывается в рабочее положение и устанавливается под необходимым углом к солнцу с помощью ручки-стойки 6 таким образом, чтобы концентрированное солнечное излучение освещало рабочие поверхности фотоприемников 4. В стойках 5 для фотоприемников 4 может быть установлен один нижний фотоприемник 4 с фотоэлектрическими преобразователями матричного типа с *p-n* переходами, расположенными параллельно концентрированному солнечному потоку, или два фотоприемника 4 с фотоэлектрическими преобразователями планарного типа, где *p-n* переходы перпендикулярны концентрированному солнечному потоку [10]. При использовании одного нижнего фотоприемника 4 верхние листы концентратора 1 посредством шарниров 2 поворачиваются таким образом, чтобы освещение концентрированным солнечным излучением переместилось на нижний фотоприемник

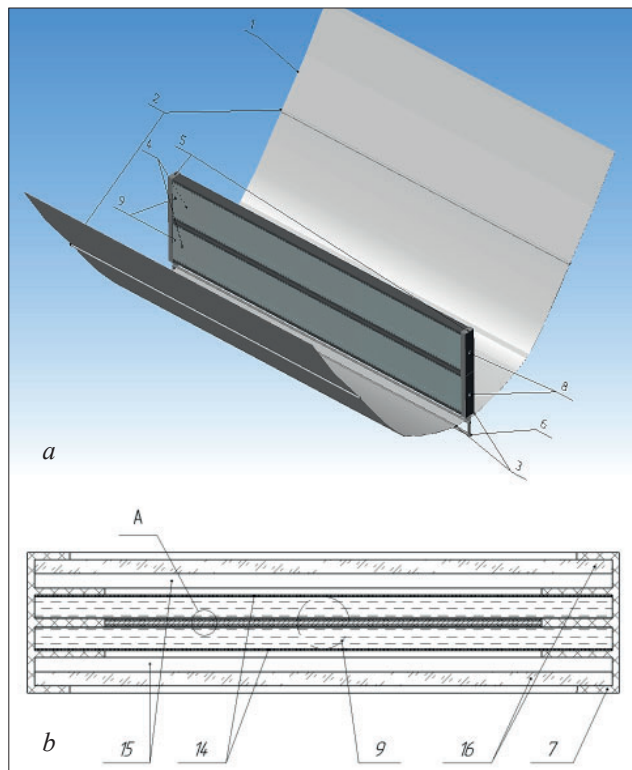


Рис. 1. Трехмерная модель складного теплофотоэлектрического концентраторного модуля с двусторонними фотоэлектрическими преобразователями модуля в разложенном состоянии (a) и чертеж поперечного разреза двустороннего фотоприемника (b)

Fig. 1. Three-dimensional model of a folding photovoltaic thermal concentrator module with two-side photovoltaic converters of the module in the unfolded state (a) and a cross-sectional drawing of a two-side photoreceiver (b)

4, который освещается только нижними листами концентратора 1. Входящие в состав фотоприемника 4, фотоэлектрические преобразователи загерметизированы с применением двухкомпонентного полисилоксанового компаунда и прозрачных полимерных пленок 14 [11]. При освещении концентрированным солнечным излучением фотоэлектрические преобразователи поглощают ту часть солнечного спектра, которая необходима им для фотоэлектрического преобразования и выработки электроэнергии, и одновременно отдают тепловую энергию для нагрева теплоносителя, так как не вся поглощенная фотоэлектрическими преобразователями энергия солнечного излучения участвует в генерации электричества. Теплоноситель, омывая обе поверхности прозрачных полимерных пленок 14, охлаждает их, двухкомпонентный полисилоксановый компаунд и фотоэлектрические преобразователи, за счет чего увеличивается электрическая эффективность работы фотоэлектрических преобразователей, общая эффективность модуля и

суммарная выработка энергии, а нагретый теплоноситель может использоваться потребителем. Поступление теплоносителя в полости корпуса 7 обеспечивается путем входного отверстия, а его выход с принятой тепловой энергией – через отверстия 9. При одновременной работе двух фотоприемников 4 движение теплоносителя происходит синхронно в одном направлении в каждом из фотоприемников 4.

Моделирование в системе конечно-элементного анализа двустороннего фотоприемника мобильного концентраторного теплофотоэлектрического модуля

С целью моделирования тепловых режимов работы солнечных теплофотоэлектрических модулей различной конструкции разработали методику, которая позволяет визуализировать тепловые процессы с использованием системы конечно-элементного анализа как односторонних, так и двусторонних фотоприемников [12] (Panchenko V., Chirskiy S., Kharchenko V. Application of the Software System of Finite Element Analysis for the Simulation and Design Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Modules. Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering. 2019. 106-131. DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch005; Panchenko V., Kharchenko V. Development and Research of PVT Modules in Computer-Aided Design and Finite Element Analysis Systems. Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development. 2019. 314-342. DOI: 10.4018/978-1-5225-9420-8.ch013; Panchenko V., Kharchenko V., Vasant P. Modeling of Solar Photovoltaic Thermal Modules. Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 866. 108-116. DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_11).

При моделировании теплового состояния двустороннего фотоприемника теплофотоэлектрического модуля исследовали влияние величины концентрации солнечного излучения (3, 6 и 9 крат), газового зазора (3, 5 и 7 мм), а также расхода теплоносителя (0,5; 5 и 50 г/с) на тепловое состояние теплоносителя. При моделировании температура фотоэлектрических преобразователей не должна превышать 60°C из-за снижения их электрической эффективности.

В качестве предварительного расчета рассмотрели часть высоковольтного матричного фотоэлектрического преобразователя: полоса шириной 10 мм, условно расположенная в средней части полного модуля, при этом длина части модуля равна длине полного модуля. Так как модуль симметричен относительно средней горизонтальной плоскости, то рассматривается только верхняя его половина (рис. 2).

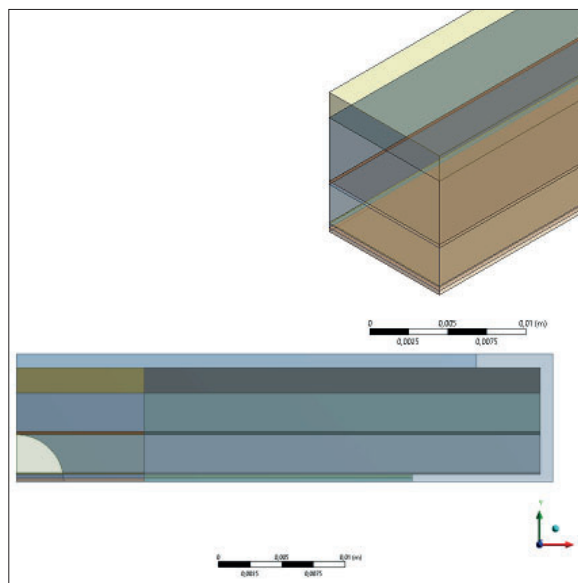


Рис. 2. Трехмерная модель двустороннего фотоприемника для моделирования в системе конечно-элементного анализа

Fig. 2. Three-dimensional model of a two-side photoreceiver for modeling in a finite element analysis system

Течение теплоносителя считается равномерным по всему сечению полости охлаждения. Проанализировали три варианта конструкции, отличающиеся высотой теплоизолирующего слоя (толщиной газового зазора) – 3, 5 и 7 мм. Изучили влияние величины концентрации солнечного излучения на тепловое состояние двустороннего фотоприемника теплофотоэлектрического модуля – рассмотрели три случая: концентрация в 3, 6 и 9 крат для каждой стороны фотоприемника. С учетом доли солнечного излучения, преобразуемого в электрическую энергию, величины теплового потока приняты равными 2400, 4800 и 7200 Вт/м². Для случая охлаждения водой с температурой 293 К осуществили моделирование теплового состояния для массовых расходов 0,05, 0,005 и 0,0005 кг/с. В процессе моделирования отметили, что при массовом расходе воды 0,05 кг/с слой воды не прогревается на всю толщину, поэтому расчет для этой величины расхода выполнили только для варианта конструкции с толщиной теплоизолятора, равной 3 мм. При охлаждении фотоэлектрических преобразователей воздухом с температурой 293 К при атмосферном давлении провели моделирование для величины массового расхода 0,01 кг/с. Так как даже при указанном расходе температура фотоэлектрических преобразователей превышает допустимое значение, расчеты для меньших массовых расходов воздуха не выполняли.

С целью оценки влияния неравномерности подвода теплоносителя построили твердотельную

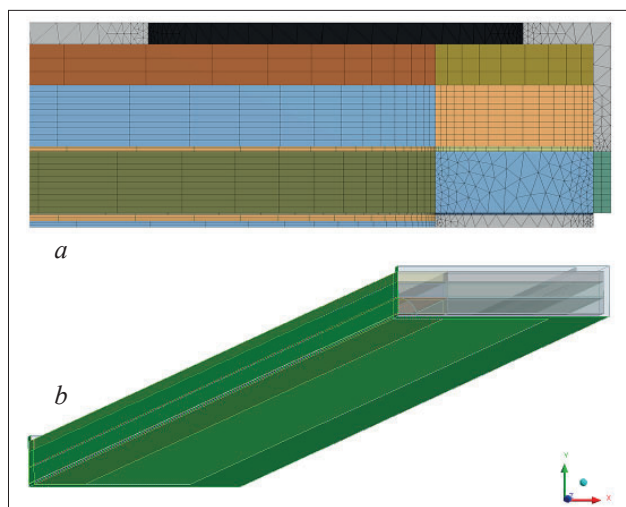


Рис. 3. Конечно-элементная модель четверти фотоприемника (a) и плоскости симметрии модели (b)

Fig. 3. Finite element model of the photoreceiver quarter (a) and the symmetry plane of the model (b)

модель четверти фотоприемника, показанную на рисунке 3a (плоскостями симметрии служат средние вертикальная и горизонтальная плоскости). На рисунке 3b плоскости симметрии отмечены зеленым цветом. Рассмотрели вариант конструкции с толщиной изоляционного слоя, равной 3 мм. Слои теплоизоляции и теплоносителя разбили по толщине на 10 слоев элементов. Внутренние слои твердых стенок (изолирующее стекло, промежуточная перегородка, герметик, изолятор и электрогенерирующий элемент) разделили по толщине на 3 слоя элементов каждый. Вход и выход охлаждающего теплоносителя осуществляется через центральные торцевые отверстия. Расход теплоносителя (для воды) задан 0,205 и 0,0205 кг/с, что эквивалентно расходу 0,05 и 0,005 кг/с для части модуля шириной 10 мм.

В фокусе мобильного концентраторного теплофотоэлектрического модуля с двусторонним фотоприемником располагаются двусторонние матричные высоковольтные фотоэлектрические преобразователи, загерметизированные с помощью двухкомпонентного полисилоксанового компаунда [10, 11]. Моделированию подвергался двусторонний фотоприемник, находящийся в фокусе складного концентратора солнечного излучения. Геометрические характеристики различных компонентов модели оптимизируются для последующего изготовления прототипа.

В результате моделирования с использованием разработанной методики получили распределение скоростей теплоносителя (рис. 4a) и температур фотоэлектрических преобразователей (рис. 4b), вид сверху [12].

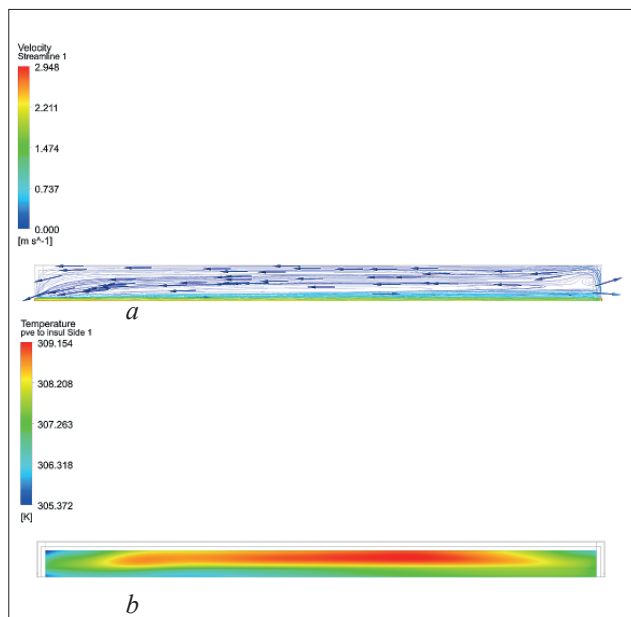


Рис. 4. Распределение скоростей теплоносителя (a) и температур фотоэлектрических преобразователей (b)
Fig. 4. Distributions of coolant velocities (a) and temperature distributions of photovoltaic converters (b)

Также в результате моделирования визуализировали скорости теплоносителя у выходного отверстия двустороннего фотоприемника (рис. 5a) и температуры фотоэлектрических преобразователей и прилегающих компонентов (рис. 5b), вид спереди.

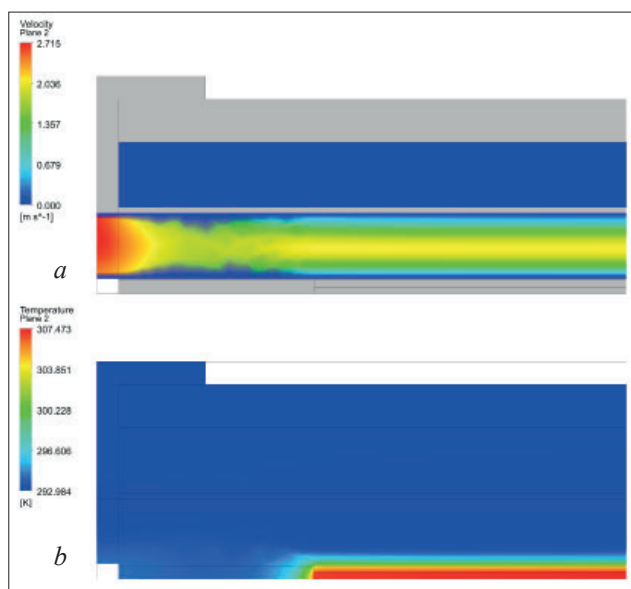


Рис. 5. Скорости теплоносителя у выходного отверстия двустороннего фотоприемника (a) и температуры фотоэлектрических преобразователей и прилегающих компонентов (b)
Fig. 5. Coolant velocities at the outlet of the two-side photoreceiver (a) and temperatures of photovoltaic converters and adjacent components (b)

В ходе анализа массива температур, полученных путем моделирования трехмерной модели двустороннего фотоприемника в системе конечно-элементного анализа, появляется возможность послойной оптимизации компонентов модели с целью обеспечения необходимого теплового режима двустороннего фотоприемника и дальнейшего его изготовления.

Изготовление мобильного концентраторного теплофотоэлектрического модуля с двусторонним фотоприемником

Для изготовления компонентов мобильного концентраторного теплофотоэлектрического модуля с двусторонним фотоприемником использовали методику изготовления компонентов солнечных модулей с применением аддитивных технологий, реализуемую посредством слайсера и 3D-принтера на основе подготовленных с помощью системы автоматизированного проектирования трехмерных моделей деталей. Благодаря разработанной технологической инструкции изготовления произвели сборку фотоприемника мобильного концентраторного теплофотоэлектрического модуля. В состав двустороннего фотоприемника входят 2 кремниевых двусторонних монокристаллических фотоэлектрических преобразователя, соединенных последовательно, двухкомпонентный полисилоксановый компаунд, защитная прозрачная тонкая лицевая пленка, зазор для теплоносителя (вода) и прозрачная пленка для его герметизации. С применением разработанной технологической инструкции осуществили сборку направляющих с концентратором солнечного излучения, стоек и упоров модуля (рис. 6a) с двусторонним фотоприемником концентраторного теплофотоэлектрического солнечного модуля (рис. 6b).

В качестве светоотражающего материала концентратора солнечного излучения может быть использована светоотражающая фольга или пленка в виде образующего профиля параболического или фасетного типа. Для возможности складывания и вращения направляющих концентратора применили шпильки с крепежными гайками (отвинчивающиеся от руки – барашки).

В состав двустороннего фотоприемника изготовленного образца концентраторного мобильного теплофотоэлектрического солнечного модуля входят 2 двусторонних кремниевых монокристаллических фотоэлектрических преобразователя, соединенных последовательно, с размерами $62,5 \times 125$ мм каждый (рис. 7a). В качестве дополнительного фотоприемника может быть добавлен второй приемник в установочное отверстие поверх первого для увеличения мощности и оптимальной работы фотоэлектрических

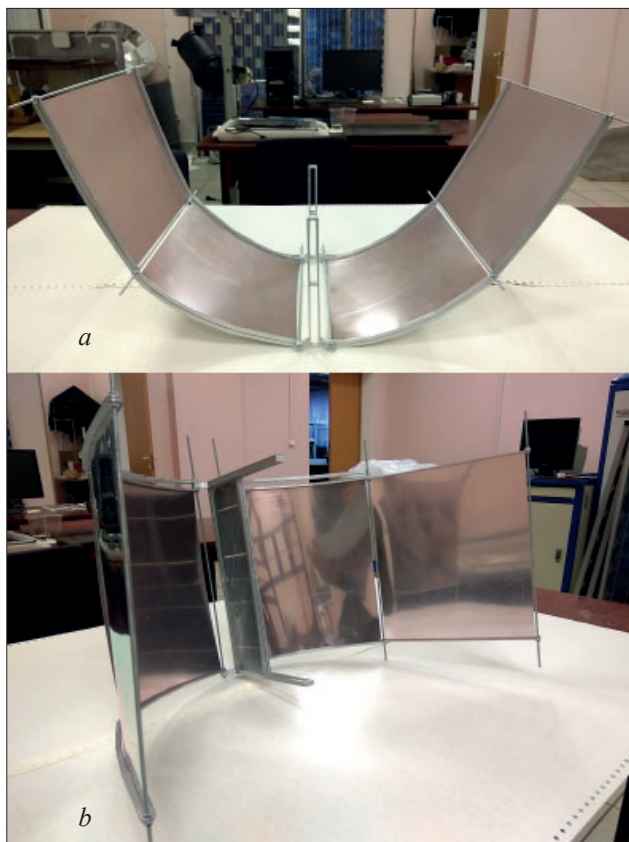


Рис. 6. Изготовленные и собранные компоненты мобильного концентраторного теплофотоэлектрического модуля (а) и концентраторный теплофотоэлектрический солнечный модуль в сборе (б)

Fig. 6. Manufactured and assembled components of a mobile concentrator photovoltaic thermal module (a) and assembled concentrator photovoltaic thermal solar module (b)

преобразователей. Следует отметить, что при изготовлении образца применяли рядовые двусторонние кремниевые монокристаллические фотоэлектрические преобразователи с относительно невысоким коэффициентом полезного действия ввиду отработки технологии изготовления. В дальнейшем в качестве электрогенерирующих элементов планируется использовать двусторонние высоковольтные матричные кремниевые фотоэлектрические преобразователи с более высоким КПД (24-28%) и соответственно большей электрической мощностью (рис. 7б) [10].

Двусторонние высоковольтные матричные кремниевые фотоэлектрические преобразователи сохраняют высокую электрическую эффективность при концентрированном солнечном излучении и, соответственно, электрическая мощность одного модуля вырастет до 55 Вт (при концентрированном солнечном излучении), а увеличенный срок службы фотоэлектрической части концентраторного теплофотоэлектрического модуля позволит добиться использования двухкомпонентного полисилоксано-

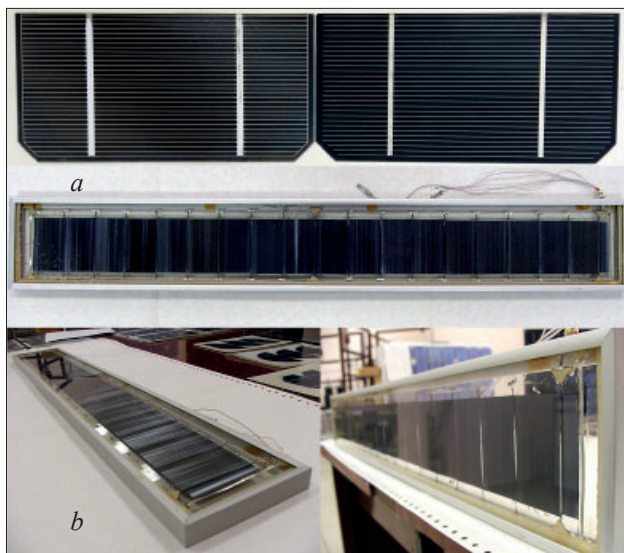


Рис. 7. Двусторонние кремниевые монокристаллические фотоэлектрические преобразователи с размерами $62,5 \times 125$ мм каждый (а) и двусторонние высоковольтные матричные кремниевые фотоэлектрические преобразователи с увеличенным коэффициентом полезного действия (б)

Fig. 7. Two-side silicon monocrystalline photovoltaic converters with dimensions of 62.5×125 mm each (a) and two-side high voltage array silicon photovoltaic converters with increased efficiency (b)

вого компаунда в процессе герметизации фотоэлектрических преобразователей.

Результаты и обсуждение. Разработали трехмерную модель складного солнечного теплофотоэлектрического модуля концентраторной конструкции с двусторонним фотоприемником, тепловое состояние, скорости теплоносителя и его линии течения визуализировали и проанализировали, после чего изготовили разработанный складной солнечный теплофотоэлектрический модуль.

Выводы. Разработанный складной солнечный теплофотоэлектрический модуль концентраторной конструкции с двусторонними фотоэлектрическими преобразователями позволяет производить автономное и мобильное энергоснабжение потребителей вдали от централизованных сетей. Использование концентратора солнечного излучения и одновременно двух рабочих сторон фотоэлектрических преобразователей дает возможность экономить кремний высокой степени очистки, а двустороннее охлаждение фотоэлектрических преобразователей обеспечивает более качественное их охлаждение и получение на выходе тепловой энергии в виде нагретой воды. Складная и мобильная конструкция модуля небольшой массы позволяет оперативно производить его сборку/разборку и транспортировать

на любые расстояния. Исследования и оптимизация конструкций солнечных теплофотоэлектрических модулей позволяют добиться максимальной эффективности солнечных модулей в виду суммирования электрической и тепловой энергии в одном модуле.

Библиографический список

1. Panchenko V. Photovoltaic solar modules for autonomous heat and power supply. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 317. Iss. 1. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/317/1/012002. EDN: NHNJPR.
2. Buonomano A., Calise F., Vicidomini M. Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors. *Energies*. 2016. Vol. 9. Iss. 7. 497. DOI: 10.3390/en9070497.
3. Dubey S., Tay A.O. Experimental Study of the Performance of Two Different Types of Photovoltaic Thermal (PVT) Modules under Singapore Climatic Conditions. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*. 2012. Vol. 2. 1-6.
4. Sandnes B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. *Experimental study and analytical model. Solar Energy*. 2002. Vol. 72. Iss. 1. 63-73. DOI: 10.1016/s0038-092x(01)00091-3.
5. Prakash J. Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy Conversion and Management*. 1994. Vol. 35. Iss. 11. 967-972. DOI: 10.1016/0196-8904(94)90027-2.
6. Bergene T., Lovvik O.M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*. 1995. Vol. 55. Iss. 6. 453-462. DOI: 10.1016/0038-092x(95)00072-y.
7. Kalogirou S.A. Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus. *Renewable Energy*. 2001. Vol. 23. Iss. 2. 247-260. DOI: 10.1016/s0960-1481(00)00176-2.
8. Dubey S., Tiwari G. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater. *Solar Energy*. 2008. Vol. 82. Iss. 7. 602-612. DOI: 10.1016/j.solener.2008.02.005.
9. Ji J., Lu J., Chow T. et al. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*. 2007. Vol. 84. Iss. 2. 222-237. DOI: 10.1016/j.apenergy.2006.04.009.
10. Панченко В.А., Стребков Д.С., Поляков В.И. и др. Высоковольтные солнечные модули с напряжением 1000 В // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2015.

N19(183). С. 76-81. DOI: 10.15518/isjaee.2015.19.010. EDN: UQDFDR.

11. Poulek V., Strebkov D.S., Persic I.S. et al. Towards 50years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. Iss. 10. 3103-3108. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.013. EDN: RGCRON.
12. Панченко В.А., Чирский С.П. Разработка и исследование солнечных теплофотоэлектрических модулей в системах автоматизированного проектирования и конечно-элементного анализа // *Строительство и техногенная безопасность*. 2019. N14(66). С. 57-72. EDN: XBYANR.

References

1. Panchenko V. Photovoltaic solar modules for autonomous heat and power supply. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 317. Iss. 1. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/317/1/012002. EDN: NHNJPR.
2. Buonomano A., Calise F., Vicidomini M. Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors. *Energies*. 2016. Vol. 9. Iss. 7. 497. DOI: 10.3390/en9070497.
3. Dubey S. and Tay A.O. Experimental Study of the Performance of Two Different Types of Photovoltaic Thermal (PVT) Modules under Singapore Climatic Conditions. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*. 2012. Vol. 2. 1-6.
4. Sandnes B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. *Experimental study and analytical model. Solar Energy*. 2002. Vol. 72. Iss. 1. 63-73. DOI: 10.1016/s0038-092x(01)00091-3.
5. Prakash J. Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy Conversion and Management*. 1994. Vol. 35. Iss. 11. 967-972. DOI: 10.1016/0196-8904(94)90027-2.
6. Bergene T., Lovvik O.M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*. 1995. Vol. 55. Iss. 6. 453-462. DOI: 10.1016/0038-092x(95)00072-y.
7. Kalogirou S.A. Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus. *Renewable Energy*. 2001. Vol. 23. Iss. 2. 247-260. DOI: 10.1016/s0960-1481(00)00176-2.
8. Dubey S., Tiwari G. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater. *Solar Energy*. 2008. Vol. 82. Iss. 7. 602-612. DOI: 10.1016/j.solener.2008.02.005.
9. Ji J., Lu J., Chow T. et al. A sensitivity study of a hybrid

- photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*. 2007. Vol. 84. Iss. 2. 222-237. DOI: 10.1016/j.apenergy.2006.04.009.
10. Panchenko V.A., Strebkov D.S., Polyakov V.I. et al. High-voltage solar modules with a voltage of 1000 V. *Alternative Energy and Ecology*. 2015. N19(183). 76-81 (In Russian). DOI: 10.15518/isjaee.2015.19.010. EDN: UQDFDR.
11. Poulek V., Strebkov D.S., Persic I.S. et al. Towards 50years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. Iss. 10. 3103-3108. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.013. EDN: RGCRON.
12. Panchenko V.A., Chirsky S.P. Development and research of solar photovoltaic thermal modules in the systems of computer-aided design and finite element analysis. *Construction and Industrial Safety*. 2019. N14(66). 57-72 (In Russian). EDN: XBYANR.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Панченко В.А. – концептуализация, формальный анализ, работа с источниками, визуализация, подготовка эксперимента, написание и подготовка черновика;

Чирский С.П. – программное моделирование, формальный анализ, написание и подготовка черновика.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Panchenko V.A. – conceptualization, formal analysis, work with sources, visualization, preparation of an experiment, writing and preparing the manuscript;

Chirskiy S.P. – software modeling, formal analysis, writing the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 29.06.2026

Статья принята к публикации 15.09.2026