

На правах рукописи



Ивановский Олег Яркович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МОБИЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ВИЭ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АПК**

Специальность: 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса
(технические науки)

Автореферат

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Научный руководитель:

Григораш Олег Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Велькин Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии»

Коноплев Евгений Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ,
доцент кафедры «Электрооборудования и энергообеспечения АПК»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный технологический
университет», г. Краснодар**

Защита диссертации состоится «26» февраля 2026 г.
в 14.00 часа на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина»: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13,
КубГАУ, корпус факультета энергетики, ауд. № 110.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета на сайте ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» www.kubsau.ru и ВАК – <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

Автореферат разослан «26» декабря 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Самурганов Евгений Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сегодня в аграрном секторе России наряду с крупными хозяйствами развиваются и небольшие частные производители – фермерские и крестьянские хозяйства. Многие производители сельскохозяйственной продукции, особенно растениеводческого направления, могут быть удалены от внешней энергетической системы, что приводит к необходимости иметь мобильные электроснабжающие установки.

В технологических процессах АПК все шире применяется оборудование на аккумуляторных источниках электропитания: различный электроинструмент (дрели, перфораторы, пилы, секаторы, триммеры, опрыскиватели и т. п.) и беспилотные летательные аппараты (мониторинг роста и состояния культур, выявления проблемных мест, анализа изменений в почве и рельефе, а также для распыления химических и биологических веществ).

Для заряда аккумуляторных батарей (АБ) электроинструмента и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также обеспечения жизнедеятельности обслуживающего персонала, предлагается использовать мобильные электростанции (МЭС), выполненные на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ).

Благодаря резкому внедрению высокоскоростных электрических машин в составе БПЛА, транспорта (самокаты, скутеры и т. д.) возникает перспектива применения этих машин в мобильных электростанциях.

Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР Кубанского ГАУ на 2021–2025 гг. ГР № 121031700099-1, а также гранта Кубанского научного фонда № МФИ-20.1/27 2022–2023 гг. «Энергоэффективные и энергосберегающие автономные системы электроснабжения на ветро-солнечных электростанциях для малых фермерских хозяйств».

Степень разработанности темы. Научные проблемы разработки энергоэффективных автономных систем электроснабжения (АСЭ), выполненные с использованием ВИЭ исследовали многие ученые: Безруких П.П., Борисов Р.И., Велькин В.И., Гайтов Б.Х., Елистратов В.В., Кашин Я.М., Коноплев Е. В., Лукитин Б.В., Сибикин Ю.Д. и другие авторы. Работы этих ученых посвящены разработке методик оценки потенциала ВИЭ, инженерным расчетам параметров функциональных элементов, а также большое внимание

уделено разработке рекомендаций по особенностям их проектирования и эксплуатации.

Работы известных ученых Воронина С.М., Кирпичниковой И.М., Кузнецова П.Н., Матвеева А.Л., Никитенко Г.В., Шерьязова С.К. и многих других ученых посвящены улучшению эксплуатационно-технических характеристик АСЭ путем оптимизации структурно-схемных решений, улучшению характеристик отдельных функциональных элементов. Однако вопросы разработки мобильных энергосистем малой мощности недостаточно исследованы.

Научными исследованиями в данной области с сельскохозяйственным уклоном в настоящее время занимаются ученые в образовательных учреждениях: Федеральный агротехнологический центр ВИМ, г. Москва; Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар; Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь; Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик.

Проблема состоит в том, что несмотря на большое разнообразие известных структурно-схемных решений МЭС, в том числе с использованием ВИЭ, и научных разработок по данной теме сегодня отсутствуют исследования, позволяющие разрабатывать энергоэффективные и эргономичные мобильные автономные электростанции малой мощности для электроснабжения удаленных потребителей электроэнергии АПК.

Рабочая гипотеза состоит в том, что проведение научных исследований по определению рациональных параметров и режимов работы преобразователей электроэнергии, выполненных на базе высокоскоростных электрических машин, позволит получить соответствующие закономерности, позволяющие разрабатывать энергоэффективные и эргономичные функциональные элементы МЭС.

Целью диссертационного исследования является обоснование параметров и режимов работы высокоскоростных электромашинных преобразователей (ВЭМП) электроэнергии для повышения энергоэффективности и эргономичности мобильных электростанций на возобновляемых источниках энергии, обеспечивающих электроэнергией удаленных потребителей АПК.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи исследований**.

1. Разработать структурную схему МЭС с использованием возобновляемых источников электроэнергии и ВЭМП для удаленных потребителей АПК.

2. Разработать алгоритм работы системы автоматического управления (САУ) МЭС в основных режимах ее функционирования.

3. Разработать методику определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи МЭС.

4. Разработать математические компьютерные модели ВЭМП и провести их исследования в программном комплексе SimInTech с анализом работы в переходных процессах функционирования преобразователя.

5. Разработать и изготовить физическую модель ВЭМП и провести экспериментальные исследования для подтверждения теоретических положений.

6. Провести технико-экономическую оценку внедрения в производство МЭС на базе ВЭМП.

Объектом исследования являются структурно-схемные решения МЭС на ВИЭ, преобразователи электроэнергии и источники питания электроинструмента и БПЛА.

Предмет исследования – параметры и режимы работы ВЭМП, технико-экономические показатели МЭС, параметры АБ электроинструмента и БПЛА.

Методы исследования базируются на использовании теории электрических цепей, основ теории электропривода и силовой преобразовательной техники, метода статической оценки точности результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также в использовании программного комплекса SimInTech.

Научную новизну работы составляют:

- структурно-схемное решение МЭС с использованием возобновляемых источников электроэнергии и ВЭМП для удаленных потребителей АПК;

- алгоритм работы САУ мобильной энергосистемы, выполненной на базе ВЭМП;

- методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи МЭС;

- компьютерные математические модели ВЭМП;

- внешние и приводные характеристики ВЭМП.

Теоретическую и практическую значимость работы составляют:

- разработанная структурная схема МЭС на возобновляемых источниках и ВЭМП для электроснабжения удаленных потребителей АПК – позволяет проводить комплексный анализ функционирования автономных электростанций, предназначенных для электроснабжения удаленных объектов АПК;
- предложенная методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи, позволяет разрабатывать энергоэффективные и эргономичные МЭС;
- предложенный алгоритм работы САУ – позволяет разработать программные продукты для прошивки микропроцессора системы управления, обеспечивающий бесперебойное и качественное электроснабжение;
- математические компьютерные модели ВЭМП – позволяют в переходных режимах функционирования МЭС получить характеристики применяемых электрических машин, работающих в двигательном и генераторном режимах, анализ которых позволит провести корректировку параметров составных элементов электростанции;
- методика и результаты экспериментальных исследований ВЭМП – повышают эффективность предпроектных работ по разработке энергоэффективных и эргономичных ВЭМП;
- разработанный и изготовленный ВЭМП для зарядки аккумуляторных батарей имеет высокую эргономичность, позволяет заряжать аккумуляторные батареи с широким спектром напряжения, что необходимо при работе от удаленных источников энергии.

Положения, выносимые на защиту:

- структурно-схемное решение МЭС на возобновляемых источниках и ВЭМП;
- алгоритм работы САУ мобильной энергосистемы, выполненной на базе ВЭМП;
- методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи МЭС;
- компьютерные математические модели ВЭМП, внешние и приводные характеристики электромашинного преобразователя;

- методика и результаты экспериментальных исследований ВЭМП;
- результаты технико-экономической оценки МЭС на ВИЭ и ВЭМП.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций базируется на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, положений, в которых нашли применение предложенные автором алгоритм работы системы автоматического управления МЭС на ВИЭ и ВЭМП, математические компьютерные модели ВЭМП и методика определения рациональной мощности функциональных элементов МЭС, которые согласованы с известными теоретическими положениями науки, а также совпадением результатов математического компьютерного и физического моделирования.

Реализация результатов исследований. Методика инженерного расчета МЭС на ВИЭ и ВЭМП, используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» г. Краснодар, структурно-схемное решение МЭС на ВЭМП и алгоритм работы системы автоматического управления переданы в ООО НТК «Солнечный центр» г. Краснодар, результаты исследований внедрены в учебный процесс.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 региональных, всероссийских и международных научно-практических конференциях: Международная научно-практическая конференция «Механизмы управления процессами внедрения технических новшеств» (г. Уфа, 2017 г.); Международная научно-практическая конференция «Роль и значение науки и техники для развития современного общества», международная научно-практическая конференция (г. Уфа, 2017 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Зеленая экономика» в агропромышленном комплексе: вызовы и перспективы развития» (г. Краснодар 2018 г.); X национальная научно-практическая конференция с международным участием 2 Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2019 г.); XVIII Международная научно-практическая конференция «Научные исследования 2025» (г. Пенза, 2025 г.); X Международная научно-практическая конференция «Иновации в науке и технологиях: глобальные перспективы и локальные решения» (г. Саратов, 2025); II Международная научно-практическая конференция «Перспективы направлений

научных исследований» (г. Самара, 2025 г.); научно-практическая конференция по итогам НИР в КубГАУ (2022–2025 гг., г. Краснодар).

Личный вклад автора заключается в формулировке темы, цели и задач исследования, проведении анализа перспектив ВЭМП, разработке структурно-схемного решения МЭС на базе ВИЭ и ВЭМП, алгоритма работы системы автоматического управления (САУ) станции, физической и математических компьютерных моделей зарядного устройства АБ электроинструмента и БПЛА на ВЭМП, а также методики определения рациональной мощности источников электроэнергии и емкости базовой АБ электростанции.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, включая 1 статью, размещенную в БД Scopus, 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 монография и 13 статей в прочих изданиях. Общий объём публикаций составляет 6,6 п. л., из которых 2,5 п. л. принадлежит лично автору.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 135 источников, и приложения. Общий объем диссертации 115 страниц машинописного текста, включая 55 рисунков и 9 таблиц.

Во введении раскрывается актуальность исследований и степень разработанности темы. Приведены цель и задачи исследований, объект и предмет исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость и положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов исследований.

В первой главе, раскрываются востребованность автономных источников электроэнергии (АИЭ), оказывающие влияние на рентабельность сельскохозяйственного производства, и перспективы ВИЭ. Показано, что одним из направлений, повышения эффективность сельскохозяйственного производства является применение электроинструмента и БПЛА. Приведены основные характеристики АБ, применяемых в электроинструментах и БПЛА. Рассмотрены современные достижения в развитии мобильных энергосистем и зарядных устройств (ЗУ). Раскрыты недостатки известных технических решений ЗУ основным из которых является то, что их каналы заряда настроены на номинальные напряжения 6, 12, 24 В, при этом, напряжение АБ электроинструмента и БПЛА изменяется в широких пределах от 3,7 до 56 В и от 14,8 до 22,2 В соответственно. Кроме того, емкость АБ электроинструмента изменяется от 1,2 до 6 А·ч, а БПЛА от 5 до 30 А·ч.

Раскрыты современные требования к ЗУ литиевых АБ.

Поскольку в последнее время значительно улучшились эксплуатационно-технические характеристики высокоскоростных электрических машин предложено включить в состав МЭС на базе ВЭМП, осуществляющий преобразование напряжения постоянного тока базовой АБ, источником заряда которых являются солнечные батареи (СБ) и ветроэнергетическая установка (ВЭУ), в напряжение переменного тока.

Приведены характеристики высокоскоростного электродвигателя серии XM6360EA-V3, на его базе предлагается разработать ВЭМП.

Во второй главе предложено структурно-схемное решение мобильной электростанции (рисунок 1). В состав МЭС входят: СБ и АБ – солнечные и базовая аккумуляторная батареи соответственно; ВЭУ – ветроэнергетическая установка; КЗ – контроллер заряда базовой АБ; ВЭМП – высокоскоростной электромашинный преобразователь постоянного тока в трехфазную систему переменного тока, содержащий электрические машины М1 (двигатель) и М2 (генератор), причем электрическая машина М1; РС – регулятор скорости; ПЧ – преобразователь частоты; РН – регулятор напряжения (управляемый выпрямитель), выполняющий функции зарядного устройства АБ с разными номинальными значениями напряжения; САУ – система автоматического управления; Ш1 и Ш2 – шины переменного тока повышенной и промышленной частоты соответственно; Ш3 – Ш5 – шины постоянного тока с разными уровнями напряжения.

САУ может быть исключена из состава МЭС, в этом случае происходит управление регуляторами РС и РН в ручном режиме.

Принцип работы САУ (рисунок 1). САУ посредством контроллера заряда КЗ контролирует параметры электроэнергии источников (СБ и ВЭУ) и базовой АБ, оптимизирует производительность ВИЭ, регулирует процесс заряда базовой АБ. Кроме того, САУ осуществляет контроль параметров электроэнергии ВЭМП, ПЧ и РН. Источником электроэнергии для ВЭМП является базовая АБ, которая постоянно подзаряжается ВИЭ. В схеме предусмотрен ввод для подключения внешней сети. Работа регуляторов РС и РН может осуществляться в автоматическом режиме или в ручном режиме.

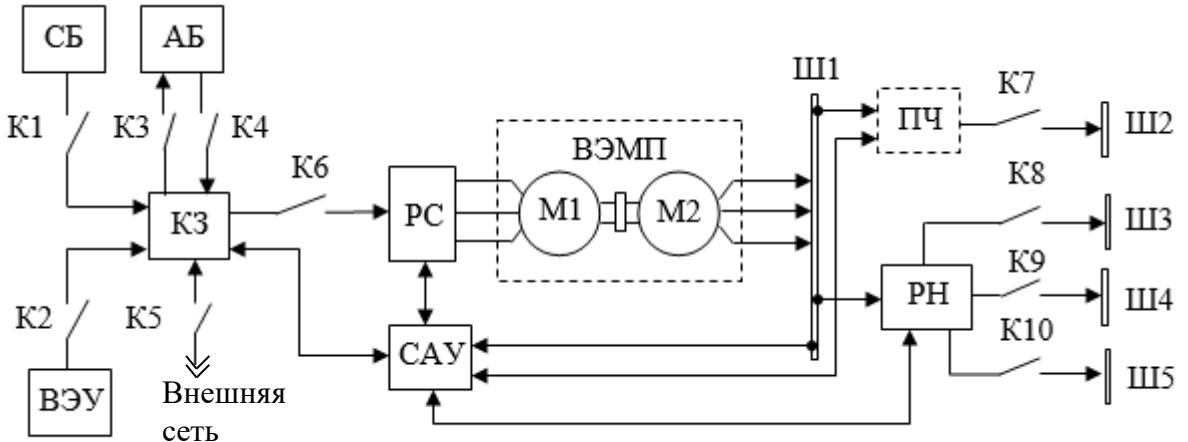


Рисунок 1 – Структурная схема МЭС на базе ВЭМП

Для разработки программного аппарата прошивки микропроцессорной техники САУ разработан алгоритм её работы в возможных режимах функционирования. Исходными данными алгоритма являются мощность источников энергии (P_{AB} , P_{SB} , P_{VZY}) и мощность нагрузки (P_H), которой является ВЭМП с подключенными АБ.

Разработана методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи МЭС, включающая следующие этапы: определяется потенциал ВИЭ; расчет среднего суточного значения энергии, потребляемой хозяйством в сезон; определение мощности, входных и выходных параметров электроэнергии ВЭМП; расчет параметров базовой АБ; определение рациональной мощности СБ и ВЭУ с учетом их потенциала и технико-экономических показателей; определение стоимости МЭС.

Для проведения теоретических исследований ВЭМП предложена структурная схема преобразователя, работающего на заряд АБ1 или АБ2 (рисунок 2).

В системе ВЭМП уравнение движения электропривода можно описать следующим выражением:

$$M_{dB} - M_{CT1} - M_{CT2} - M_{GEN} = J_{CIST} \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где M_{dB} , M_{GEN} – моменты соответственно двигателя и генератора; M_{CT1} , M_{CT2} – статические моменты, связанные с взаимодействием

постоянных магнитов с железом статора; $J_{СИСТ}$ – момент инерции системы механических составляющих; ω – угловая скорость системы.

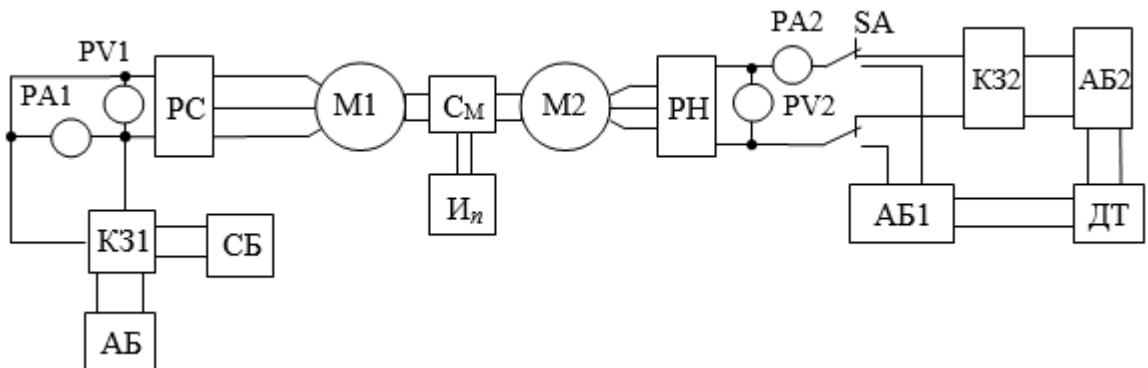


Рисунок 2 – Структурная схема зарядного устройства на базе ВЭМП:
 М1 и М2 – электрические машины; С_м – соединительная муфта;
 И_н – измеритель частоты вращения; РС и РН – регуляторы скорости и напряжения;
 КЗ1 и КЗ2 – контроллеры заряда; ДТ – датчик температуры;
 РА и РВ – амперметры и вольтметры; АБ1 и АБ2 – заряжаемые
 аккумуляторные батареи

Поскольку длительность электромагнитных процессов в высокоскоростных электрических машинах соизмерима с длительностью механических процессов, что связано с малыми инерционными массами подвижных частей, то нужно учитывать в аналитических выражениях электромагнитную постоянную времени.

Получены уравнения механических характеристик двигателя и генератора и уравнения движения с учетом электромагнитной инерции:

$$\left. \begin{aligned} M_{ДВ} &= \beta\omega_0_{ДВ} - \beta\omega - T_{ЭДВ} \frac{dM_{ДВ}}{dt}, \\ M_{ГЕН} &= \gamma\omega_0_{ГЕН} + \gamma\omega - T_{ЭГЕН} \frac{dM_{ГЕН}}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где β , γ – коэффициенты жёсткости характеристик ($\Delta M / \Delta \omega$) соответственно двигателя и генератора; $T_{ЭДВ}$, $T_{ЭГЕН}$ – электромагнитные постоянные времени соответственно двигателя и генератора.

После преобразования уравнений (1) и (2) можно получить однотипные дифференциальные уравнения для скоростей и моментов двигателя и генератора в установившемся режиме:

$$T_M T_\vartheta \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{VCT} \quad (3)$$

$$T_M T_{\mathcal{E}} \frac{d^2 M}{dt^2} + T_M \frac{dM}{dt} + M = M_{уст} \quad (4)$$

где T_M и $T_{\mathcal{E}}$ – механическая и электромагнитная постоянные соответственно; $M_{уст}$ и $\omega_{уст}$ – установившиеся значения соответственно момента и угловой скорости.

Характеристические уравнения для скоростей и моментов будут второго порядка с определением корней классическими способами. Большое значение приобретает отношение постоянных времени механической и электромагнитной. От этого соотношения зависит характер протекающих переходных процессов: в виде затухающих или незатухающих колебаний.

Для исследования переходных процессов разработаны несколько компьютерных моделей ВЭМП: с наличием регуляторов скорости и выпрямителя и без них. Все модели реализовывались с использованием программного обеспечения SimInTech, одна из которых представлена на рисунке 3. Дальнейший анализ переходных процессов проводился на конкретных электрических машинах с соответствующими регуляторами с мощностью до 3 кВт. В результате анализа установлено, что в таких машинах электромагнитная постоянная значительно превосходит механическую – практически в 10 раз, что приводит к значительной длительности автоколебаний – от 3 до 25 секунд в зависимости от вида регулирования. Так, например графики при изменении нагрузки представлены на рисунке 4, а.

Анализ полученных характеристик позволил сделать вывод о необходимости увеличить электромагнитную постоянную времени. Предложено увеличить постоянную времени выходного регулятора напряжения (выпрямитель) с 0,25 до 2,5 с, что позволило значительно сократить колебательные процессы в электрических машинах (рисунок 4, б). Для снижения автоколебаний двигателя в момент пуска предложено проводить управление плавно в ручном или автоматическом режиме.

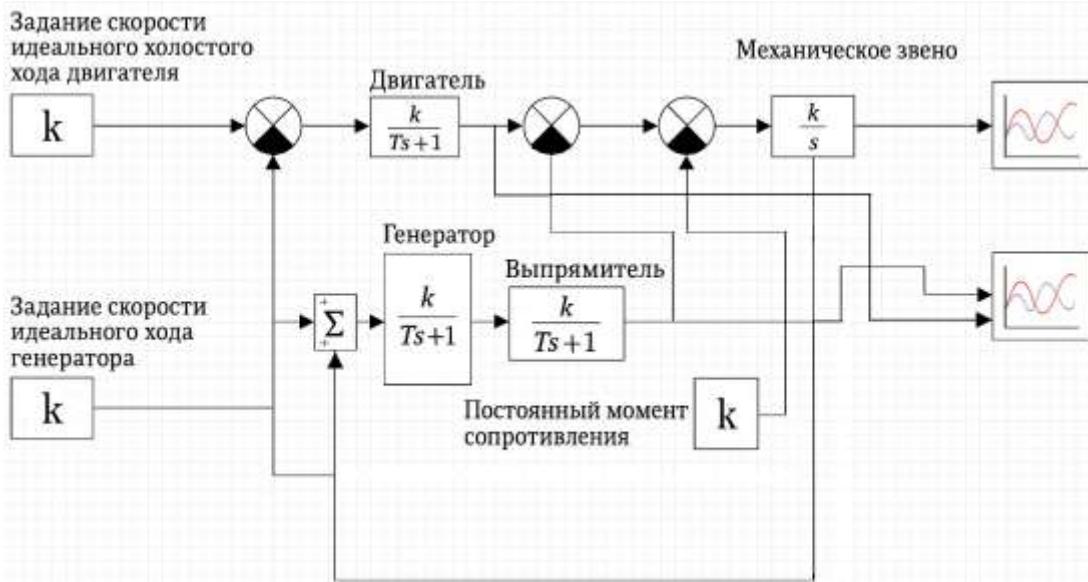


Рисунок 3 – Компьютерная модель ВЭМП с выпрямительной нагрузкой в ПО SimInTech

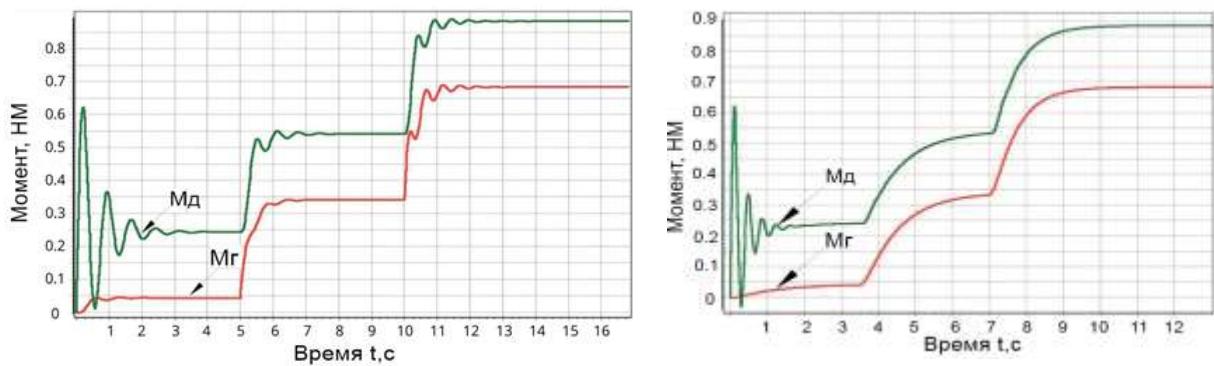


Рисунок 4 – График изменения моментов двигателя (M_d) и генератора (M_g) при приложении нагрузки с постоянной времени выпрямителя $T = 1$ с (а) и $T = 2,5$ с (б)

Во третьей главе для подтверждения теоретических исследований разработан испытательный стенд ВЭМП (рисунок 5). ВЭМП выполнен на базе электродвигателей серии XM6360EA-V3. В качестве регуляторов использовались преобразователи типа FLYcolor X-cross YV3160F. Динамические процессы оценивались с помощью осциллографа-мультиметра SIGLENT АКИП-4125.

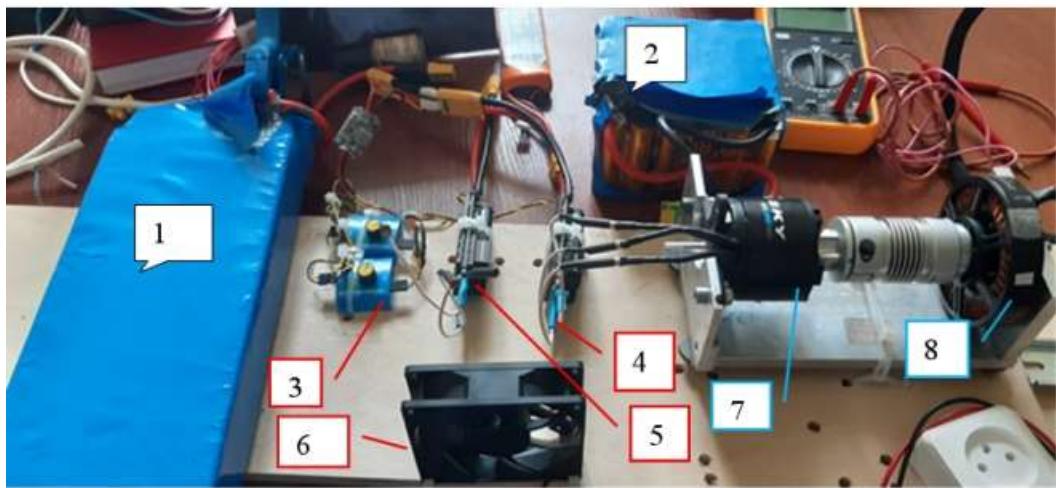


Рисунок 5 – Внешний вид испытательного стенда ВЭМП:
 1 – базовая АБ; 2 – заряжаемая АБ; 3 – потенциометры; 4 – регулятор напряжения; 5 – регулятор оборотов; 6 – вентилятор; 7 и 8 – электродвигатель М1 и генератор М2 (рисунок 3)

В результате экспериментальных исследований были получены механические характеристики приводного двигателя (рисунок 6). Из графиков рисунка 6 видно, что при малых скоростях вращения после приложения нагрузки резко снижается частота вращения данной пары машин.

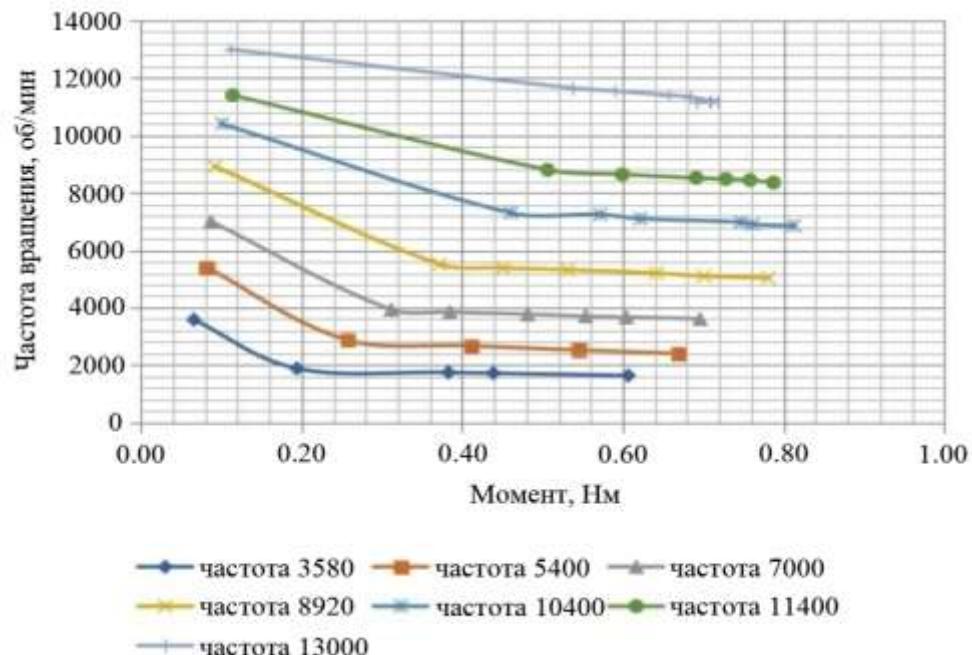


Рисунок 6 – Механические характеристики приводного двигателя

Для создания эффективного режима заряда батарей необходимо знать характеристики генератора в различных режимах управления. На рисунке 7 приведен график изменения переменного напряжения на генераторе и постоянного напряжения на выходе регулятора напряжения. Как видно из приведенных характеристик изменение выходного напряжения от частоты вращения генератора имеет практически линейный вид. На рисунке 8 изображены графики изменения выходного напряжения генератора при приложении нагрузки. Здесь также можно наблюдать изменение жесткости характеристик при регулировании частоты вращения электродвигателя.

В результате проведения исследований получено семейство динамических характеристик, подтверждающих наличие колебаний в переходных процессах. Анализ постоянных времени двигателя и генератора, полученные теоретически, подтверждается экспериментами. Увеличение электромагнитной постоянной времени с 0,5 с до 2,5 с привело к ликвидации автоколебаний и сокращению времени переходного процесса на генераторе при приложении нагрузки до 3–4 с.

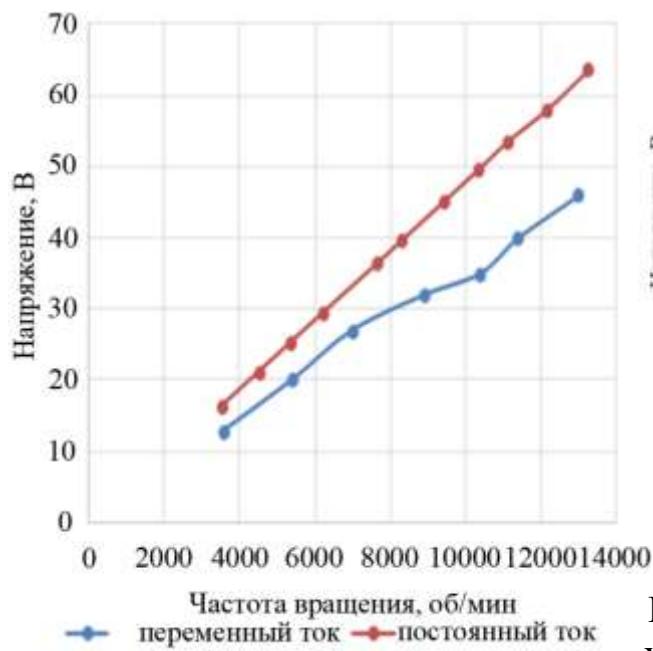


Рисунок 7 – Зависимость выходного напряжения на генераторе и регуляторе от частоты вращения

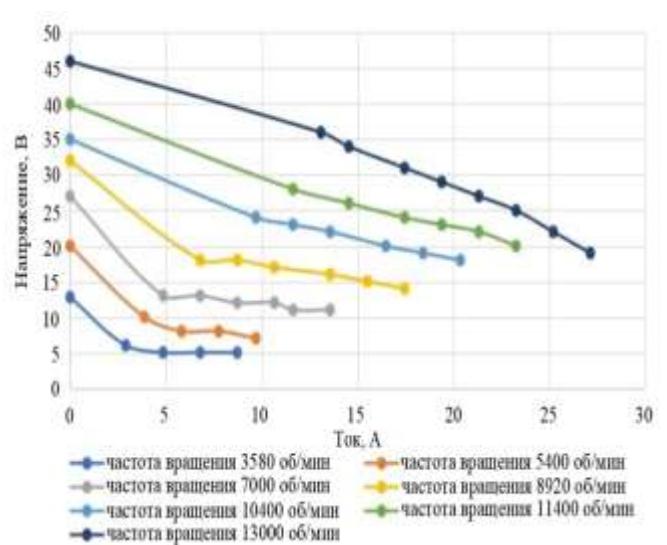


Рисунок 8 – Графики изменения выходного напряжения генератора при изменении тока нагрузки

Проведено сравнение технико-экономических показателей известных и разработано структурно-схемное решение автономных электростанций, выполняющих функции зарядных устройств, для заряда АБ электроинструментов и БПЛА в полевых условиях. При одной и той же мощности ЗУ, предложенное структурное решение ЗУ на ВЭМП имеет следующие преимущества: обеспечивает заряд АБ в широком диапазоне значений их номинального напряжения от 3 до 60 В; общие затраты на электростанцию на базе ВЭМП в 2,3 раза меньше чем на электростанцию на бензоагрегате и в 1,6 раз меньше чем на электростанции на гибридных инверторах.

Для обеспечения фермерских хозяйств малой мощности (суточное потребление энергии до 30 кВт·ч) необходимо организовать серийное производство МЭС адаптированных к конкретным сельскохозяйственным потребителям установок. Проведено технико-экономическое обоснование постановки на серийное производство 100 шт. МЭС в состав которой входили солнечный модуль, роторная ветроустановка, базовая АБ, контроллер заряда и ВЭМП. Затраты на НИОКР составляют 231 тыс. руб. Отпускная цена одной установки составляет 301, 65 тыс. руб. Срок окупаемости МЭС около 7 лет с учётом ежегодной выплаты кредита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана структурная схема МЭС, которая содержит солнечные батареи, роторную ВЭУ, базовую АБ и ВЭМП, регуляторы скорости и напряжения электромашинного преобразователя, и систему автоматического управления (САУ), обеспечивающую заряд АБ электроинструмента и БПЛА с разными номинальными значениями напряжения.

2. Разработан алгоритм работы САУ мобильной энергосистемы в основных режимах ее функционирования. Особенности работы САУ заключаются в совместной работе с контроллером заряда по каналам контроля параметров электроэнергии источников, кроме того, САУ осуществляет контроль параметров ВЭМП и нагрузки, а также управляет работой коммутационных аппаратов.

3. Разработана методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой

аккумуляторной батареи МЭС. Особенностью которой является то, кроме определения потенциала ВИЭ и среднего суточного значения энергии, потребляемой хозяйством, проводится расчет параметров ВЭМП, емкости базовой АБ и выбор источников электроэнергии по мощности с учетом их технико-экономических показателей.

4. Разработаны математические компьютерные модели ВЭМП в ПО SimInTech и проведены теоретические исследования, которые показали, что длительность электромагнитных процессов в высокоскоростных электрических машинах превосходит длительность механических процессов, а это приводит к появлению автоколебаний параметров, длительность которых в машинах до 3 кВт доходит до 25 секунд.

В результате моделирования предложено увеличение постоянной времени выпрямителя с 0,25 с до 2,5 с, что позволяет значительно уменьшить амплитуду колебаний переходного процесса на генераторе. Введение в структурную схему блока плавного регулирования угловой скорости электродвигателя с постоянной времени 3 с позволило ликвидировать колебательные процессы тока при пуске.

5. Для подтверждения результатов теоретических исследований разработано и изготовлено ЗУ на базе ВЭМП. По результатам экспериментальных исследований получены внешние и приводные характеристики ВЭМП. Установлено, что механические характеристики двигателя и генератора имеют характерную линейную зависимость угловой скорости от момента. Также выявлена линейная зависимость выходного напряжения от нагрузки при постоянной установленной регулятором скорости двигателя. Получило подтверждение наличие при пуске и последующем изменении режимов работы переходного процесса с бросков тока, что совпадает с теоретическими исследованиями. Доказана необходимость увеличения постоянной времени выпрямителя до 2,5 с для устранения колебаний тока в генераторе при переходных процессах и введение плавного регулирования напряжения на двигателе для ликвидации автоколебаний при пуске.

6. Проведено сравнение технико-экономических показателей известных и предлагаемого структурно-схемного решения автономных электростанций, выполняющих функции ЗУ, для заряда АБ электроинструментов и БПЛА в полевых условиях. Результаты расчета показали, что общие затраты на электростанцию на базе

ВЭМП в 2,3 раза меньше, чем на электростанцию на бензоагрегате и в 1,6 раз меньше, чем на электростанции на гибридных инверторах. Срок окупаемости МЭС около 7 лет.

Рекомендации производству

Для разработки энергоэффективных и эргономичных структурно-схемных решений МЭС, обеспечивающих электроэнергией удаленных потребителей АПК, в том числе применяемых для заряда АБ, необходимо использовать предложенную методику определения рациональной мощности ВИЭ и емкости базовой АБ.

В хозяйства АПК, удаленных от централизованных электрических сетей нужно применять предлагаемую МЭС с ВЭМП, что улучшит условия труда производителей сельскохозяйственной продукции и повысит рентабельность производства.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования должны быть направлены на улучшение технико-экономических и эксплуатационно-технических характеристик функциональных элементов МЭС. Перспективным является направление модульного агрегирования силовых элементов МЭС. Необходимо продолжить исследования по использованию ВЭМП для подключения других потребителей: сварочные аппараты, электроприводы рабочих машин сельскохозяйственного направления.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке МЭС, предназначенных для работы в других отраслях народного хозяйства, а также для обеспечения аварийно-спасательных и аварийно-восстановительных работ.

Основные положения диссертации опубликованы

– в изданиях, размещенных в БД Scopus:

1. Uninterruptible power supply for renewable energy sources / O. V. Grigorash, A. Y. Popov, E. V. Vorobev, **O. Y. Ivanovsky** [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Stavropol, 21–22 октября 2019 года. Vol. 488. – Stavropol, 2020. – P. 012017. – DOI 10.1088/1755-1315/488/1/012017.

– в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

2. Григораш, О.В. Источники электроэнергии устройств управления, контроля и защиты / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский**, А. С. Туаев // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 1013–1023. – DOI 10.21515/1990-4665-132-078.

3. Григораш, О. В. Методика расчета фильтров статических преобразователей электроэнергии / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский**, А. С. Туаев // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 133. – С. 850–860. – DOI 10.21515/1990-4665-133-064.

4. Ветроэнергетика: проблемы и направления развития / О. В. Григораш, Е. В. Воробьев, **О. Я. Ивановский**, О. Э. Ивановский // Сельский механизатор. – 2020. – № 2. – С. 2–3.

5. Григораш, О. В. Развитие энергетики в мире и России / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский**, С. Джибо // Сельский механизатор. – 2020. – № 7. – С. 2–3.

6. Григораш, О. В. Перспективы использования новых видов источников энергии / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский**, А. С. Туаев // Сельский механизатор. – 2021. – № 1. – С. 26–27.

7. Перспективы солнечной энергетики в России / О. В. Григораш, Е. В. Воробьев, **О. Я. Ивановский**, А. Э. Коломейцев // Сельский механизатор. – 2022. – № 1. – С. 30–31.

8. Характеристики высокоскоростных электромашинных преобразователей / О. В. Григораш, С. В. Оськин, **О. Я. Ивановский**, Д. В. Коваль // Сельский механизатор. – 2025. – № 11. – С. 10–12.

– в монографии:

9. Новая элементная база возобновляемых источников электроэнергии : монография / О. В. Григораш, А. Ю. Попов, Е. В. Воробьев, **О. Я. Ивановский** [и др.]. – Краснодар : ООО «Крон», 2018. – 202 с. – ISBN 978-5-6040179-4-4.

– в других изданиях:

10. **Ивановский, О. Я.** Источники питания систем управления и защиты / О. Я. Ивановский, И. А. Рутковский // Наука и образование: проблемы и стратегии развития. – 2017. – Т. 1, № 1 (3). – С. 66–68.

11. **Ивановский, О. Я.** О качестве электроэнергии в энергетических системах / О. Я. Ивановский // Роль и значение науки и техники для развития современного общества : сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 частях, Уфа, 15 октября 2017 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2017. – С. 39–41.

12. **Ивановский, О. Я.** Статические преобразователи электроэнергии с промежуточным звеном повышенной частоты / О. Я. Ивановский, Г. С. Отмахов // Механизмы управления процес-

сами внедрения технических новшеств : сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 15 октября 2017 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2017. – С. 53–55.

13. Рутковский, И. А. Конверторы с улучшенными техническими характеристиками / И. А. Рутковский, **О. Я. Ивановский** // Наука и образование: проблемы и стратегии развития. – 2017. – Т. 1, № 1(3). – С. 96–98.

14. **Ивановский, О. Я.** Концепция развития бесперебойных систем электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О. Я. Ивановский, О. В. Григораш // «Зеленая экономика» в агропромышленном комплексе: вызовы и перспективы развития : Материалы всероссийской научной конференции , Краснодар, 18 октября 2018 года. – Краснодар: ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ-филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2018. – С. 131–137.

15. Концепция построения энергоэффективных систем электроснабжения / О. В. Григораш, К. В. Пигарев, **О. Я. Ивановский**, А. С. Туаев // Технический оппонент. – 2018. – № 1(1). – С. 40–45.

16. Григораш, О. В. Особенности модульного агрегатирования автономных систем электроснабжения / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский**, А. С. Туаева // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2019. – № 4(40). – С. 124–128.

17. Григораш, О. В. Особенности параллельной работы статических преобразователей электроэнергии / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский**, А. С. Туаев // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 22 апреля 2019 года / Под общ. ред. Трушкина В.А. – Саратов: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2019. – С. 62–64.

18. Григораш, О. В. Стабилизатор напряжения и частоты тока ветроэнергетической установки / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский**, Д. В. Головин// Национальная ассоциация ученых (НАУ). – 2019. – № 44. – С. 21–24.

19. Григораш, О. В. Электромагнитная совместимость функциональных элементов автономных систем электроснабжения / О. В. Григораш, А. С. Туаев, **О. Я. Ивановский** // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы X национальной научно-

практической конференции с международным участием, Саратов, 22 апреля 2019 года / Под общ. ред. Трушкина В.А. – Саратов: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2019. – С. 64–65.

20. Григораш, О. В. Мобильная энергосистема на базе высокоскоростного электромашинного преобразователя электроэнергии / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский** // Научные исследования 2025 : Сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 05 сентября 2025 года. – Пенза: Наука и Пропаганда (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 77–79.

21. Григораш, О. В. Мобильное зарядное устройство на возобновляемых источниках и высокоскоростном электромашинном преобразователе электроэнергии / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский** // Перспективные направления научных исследований : Материалы II Международной научно-практической конференции, Самара, 10 сентября 2025 года. – Саратов: ООО «Центр профессионального менеджмента «Академия Бизнеса», 2025. – С. 9–15.

22. Григораш, О. В. Перспективы высокоскоростных электромашинных преобразователей в автономных системах электроснабжения / О. В. Григораш, **О. Я. Ивановский** // «Инновации в науке и технологиях: глобальные перспективы и локальные решения». X Международная НПК _ Саратов: НОП «Цифровая наука». – 2025. – С. 5–9.

Автореферат

Ивановский Олег Яркович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
НА ВИЭ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АПК**

Подписано в печать «23» декабря 2025 г. Формат 60×84 1/16.

Бум. тип. № 1. Усл. печ. л. – 1,3.

Тираж 100 экз. Заказ № 100.