

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина»

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)

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Григораш Олег Владимирович
доктор технических наук, профессор

Краснодар
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ.....	10
1.1 Востребованность автономных источников электроэнергии в АПК.....	10
1.2 Основные характеристики аккумуляторных батарей разных типов их достоинства и недостатки	14
1.3 Анализ современных достижений в развитии мобильных энергосистем.....	22
1.4 Перспективы высокоскоростных электромашинных преобразователей в составе мобильных энергосистем	29
1.5 Выводы, цель и задачи исследований.....	35
2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ МОБИЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЭЛЕКТРОМАШИННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО РАБОТЫ	38
2.1 Разработка структурной схемы мобильной энергосистемы на высокоскоростном электромашинном преобразователе электроэнергии.....	38
2.2 Методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи.....	44
2.3 Теоретические исследования высокоскоростного электромашинного преобразователя и анализ переходных процессов	49
2.4 Компьютерное моделирование переходных процессов в ВЭМП.....	57
2.5 Выводы.....	68

3 МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОБИЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.....	70
3.1 Разработка стенда и методики проведения исследований ВЭМП.....	70
3.2 Результаты экспериментальных исследований	71
3.3 Техничко-экономическая оценка мобильной энергосистемы на ВЭМП	79
3.3.1 Оценка экономических показателей зарядных устройств.....	79
3.3.2 Оценка экономических показателей мобильной энергосистемы...	82
3.4 Выводы.....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	94
Приложение А	113
Приложение Б	114
Приложение В.....	115

ВВЕДЕНИЕ

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 агроинженерный 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, позво-

ляющие 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 «Инновации 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).

1 СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ

1.1 Востребованность автономных источников электроэнергии в АПК

Согласно данным Росстата на март 2025 года, объем производства сельскохозяйственной продукции малыми фермерскими хозяйствами (МФХ) России в 2024 году достиг 1,265 триллиона руб, при этом, этот показатель за последние 5 лет вырос на 30 %. Особенностью многих МФХ является сезонное производство и удаление от внешней энергетической системы. При этом, одним из важных факторов, оказывающим влияние на рентабельность сельскохозяйственного производства является рациональное использование энергоресурсов в технологических процессах и обеспечение жизнедеятельности обслуживающего персонала [22, 34, 56].

Традиционные автономные источники электроэнергии (АИЭ) дизельные и бензоэлектростанции, и возобновляемые источники энергии (ВИЭ) сегодня широко применяются для электроснабжения потребителей электроэнергии МФХ занимающихся производством меда, мяса, шерсти, рыбы, выращиванием овощей и фруктов, а также для обеспечения бытовых условий обслуживающего персонала [11, 36, 42, 45].

Основными недостатками традиционных АИЭ являются; повышенные эксплуатационные затраты, связанные, прежде всего, с расходом топлива, а также с техническим обслуживанием; относительно небольшой ресурс обслуживаемой работы (для дизельных электростанций мощностью до 5 кВт он составляет до 5000 часов, а бензоэлектростанций – не более 2000 часов); повышенный шум во время работы; низкая эргономичность.

Как известно эргономика направлена на создание комфортных и безопасных условий труда. Одной из основных целей, которой также является повысить производительность труда. Другими словами, это удобное устрой-

ство, конструкция, аппарат и т. п., которое позволяет экономить время и энергию.

Применение ВИЭ для электроснабжения потребителей электроэнергии, удаленных от внешней энергетической системы экономически выгоднее в регионах с повышенным потенциалом солнечной и ветровой энергетики. К таким регионам относится Краснодарский край, где в летний период в среднем по региону уровень солнечной энергии превышает 1500 кВт/ч на квадратный метр, а средняя скорость ветра на большей части территории превышает 4 м/с [20, 26, 28, 29, 132].

Одним из направлений, позволяющих повысить эффективность сельскохозяйственного производства, является применение электроинструментов (дрель, перфоратор, пила, секатор, триммер, опрыскиватель и т.п.) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), питание которых осуществляется от аккумуляторных батарей (АБ). БПЛА – дроны, применяются все шире для мониторинга роста и состояния культур, выявления проблемных мест, анализа изменений в почве и рельефе, а также для распыления химических и биологических веществ [3, 11, 23].

Аккумуляторные инструменты имеют ряд преимуществ над сетевыми инструментами. Отсутствие проводов, мобильность, независимость от сети делают аккумуляторные инструменты весьма привлекательными в части удобства применения. Важным преимуществом инструмента, работающего от АБ является также возможность их работы в сложных условиях (повышенная влажность, пониженные или, наоборот, повышенные температуры), поскольку их работа осуществляется на пониженном напряжении, в основном 18, 24 и 36 В, реже 48 и 72 В.

На рисунке 1.1 приведены электроинструменты, на рисунке 1.2 – модели дронов, а на рисунке 1.3 газонокосилки, применяемые в сельском хозяйстве.

Емкость современных литиевых АБ позволяет работать длительное время, а если в резерве использовать еще один АБ, то работа может быть вообще непрерывной. Пока разряжается один АБ, другой заряжается.



Рисунок 1.1 – Электроинструменты, применяемые в сельском хозяйстве: шуруповерты (а); дрели (б); секаторы (в); пилы (г); опрыскиватели (д); триммеры (е); перфораторы (ж); цепные пилы (з)



а)



б)

Рисунок 1.2 – Модели дронов, применяемые в сельском хозяйстве:
Agras T40 (а); XAG V40 (б)



а)



б)

Рисунок 1.3 – Модели газонокосилок: Ryobi RL (а); Makita DLM (б)

Основными недостатками аккумуляторных инструментов в сравнении с сетевыми, при одинаковой мощности, являются больший вес и высокая стоимость, обусловленные применением в их конструкции аккумуляторных батарей (АБ). Однако использование принципа «один аккумулятор и много инструмента» позволяет значительно экономить при покупке.

Применение БПЛА в сельском хозяйстве позволяет быстро и точно обследовать большие площади и определить состояние растений и почвы, практически за несколько минут. С помощью камеры и сенсоров обнаруживают заболевания, дефицит влаги и повреждения от вредителей. Значительный

экономический эффект достигается за счет точного распыления удобрений (обрабатываются только проблемные участки). Кроме того, они позволяют осуществлять мониторинг посевов и обрабатывать поля в труднодоступных местах.

Таким образом, преимущества электроинструмента и БПЛА, работающих от АБ, связаны с мобильностью, удобством эксплуатации, экологичностью и производительностью. Все эти преимущества в комплексе позволят повысить рентабельность сельскохозяйственного производства [3, 14, 47].

Целесообразно рассмотреть особенности работы, достоинства и недостатки разных типов аккумуляторных батарей, которые могут применяться в автономных энергосистемах.

1.2 Основные характеристики аккумуляторных батарей разных типов их достоинства и недостатки

Одним из важных функциональных элементов, определяющих эффективность и эргономичность использования электроинструментов, являются аккумуляторные батареи (АБ).

Сегодня известны три основных типа АБ, которые применяются в автономных системах электроснабжения: свинцово-кислотные; никель-кадмиевые и литий-ионные [96, 117, 118, 129].

Свинцово-кислотные (SLA) АБ.

Для солнечной энергетики в тяжелых циклических режимах эксплуатации разработаны герметизированные свинцово-кислотные АБ, которые характеризуются низким выделением газов и обеспечивают длительный срок службы. Их энергоемкость достигает 30–40 Вт·ч/кг. Они отличаются низкой ценой по сравнению с другими типами АБ, надежностью в работе благодаря хорошо отработанным технологиям изготовления.

Герметичные модели этих аккумуляторов не нуждаются в обслуживании. К таким моделям относятся батареи с технологией AGM и GEL. Они не

требуют вентилируемого помещения для установки и характеризуются низким газовыделением. Вместо электролита в таких АБ используется стекловолокно (AGM) и гель (GEL) [115, 130].

Основными недостатками свинцово-кислотных АБ являются:

- большая масса и габариты;
- низкая энергоемкость;
- срок службы не превышает 6 лет;
- большая чувствительность к переменам температуры;
- хранятся только в заряженном состоянии;
- токсичность свинца и кислоты;
- имеют ограничения циклы заряд-разряд, если часто допускается полный разряд – меньше 20 % от емкости батареи, то циклов заряд-разряд может быть не более 100.

Никель-кадмиевые (Ni-Cd) АБ.

АБ этого типа содержат два электрода: никелевый и кадмиевый. Первый представляет собой гидроксид никеля, который смешан с проводящим материалом, а второй представляет собой сетку из стали, в которую впрессован кадмий. Пространство между ними заполнено щелочью. В результате происходит химический процесс с участием гидроксидов никеля, кадмия и воды, который является обратимым.

Никель-кадмиевые АБ могут храниться в разряженном состоянии и это не отражается на его характеристиках. Важной особенностью никель-кадмиевых АБ является их низкое внутреннее сопротивление, поэтому они не нагреваются при зарядке, даже большими токами. Нагрев происходит только после полного заряда. Ресурс современных промышленных АБ достигает 25 лет [114, 123].

Основные преимущества никель-кадмиевых АБ:

- широкий температурный диапазон эксплуатации;
- большое количество циклов заряд-разряд;
- ресурс работы превышает ресурс свинцовых батарей;

- возможность длительного хранения в разряженном состоянии;
- стабильность работы (не снижается емкость при низких температурах);
- более высокий уровень безопасности в сравнении с литиевыми батареями (при разгерметизации они не загораются).

Недостатки никель-кадмиевых АБ:

- высокий уровень саморазряда (10–12 % емкости теряют за месяц, есть модели, которые за 2 месяца полностью разряжаются);
- необходимо полностью разряжать (выраженный эффект памяти: батарея запоминает уровень напряжения, до которого была разряжена, и при последующем заряде отдает энергию лишь до этого уровня, т. е. если батарея разрядится на 50 %, ее емкость уменьшится вдвое);
- низкая энергетическая плотность в сравнении с другими типами АБ;
- содержит токсичные материалы (кадмий – ядовитый металл, поэтому в ряде стран запрещено производство такого типа батарей, хотя их использование разрешено).

Литий-ионные (Li-ion) АБ.

Принцип работы АБ заключается в циклическом процессе заряда и разряда. Это связано с электрохимическими реакциями, которые происходят на аноде и катоде. Катод батареи обычно состоит из оксида литиевого металла, накапливает и высвобождает ионы лития во время цикла заряд-разряд. Анод производят из графита, но в некоторых современных батареях для повышения плотности энергии используют кремний. Электролит является проводящим раствором, который содержит соли лития. АБ содержит также пористую мембрану – сепаратор, которая предотвращает прямой контакт между положительным и отрицательным электродами, обеспечивая при этом прохождение ионов лития [116, 126].

В зависимости от использованного материала катода литий-ионные АБ по конструкции делятся также на несколько типов:

– литий-марганцевые (LiMn_2O_4 , LNO), имеют меньшее внутреннее сопротивление в сравнении с другими типами литиевых батарей, высокую мощность и энергоемкость – 100–150 Вт·ч/кг;

– литий-кобальтовые (LiCoO_2 , LCO) энергоемкость которых находится в пределах 150–200 Вт·ч/кг, но уступают аналогам по термической стабильности и сроку службы (до 1000 циклов), токи заряда и разряда для этих батарей не должны превышать 1С;

– литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (NMC, NCM), имеют высокую мощность и энергоемкость – 150–220 Вт·ч/кг, до 2000 циклов;

– литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (NCA), отличаются высокой удельной энергоемкостью – 200–260 Вт·ч/кг, ресурс около 500 циклов, зарядные токи 0,7 С и разрядные 1 С;

– литий-железо-фосфатные (LFP, LiFePO_4), отличаются большим ресурсом – более 2000 циклов, термической и химической стабильностью, высокой безопасностью эксплуатации и малым внутренним сопротивлением. Используются такие элементы питания в устройствах, для которых важна выносливость аккумуляторов, способность работать на морозе и выдерживать высокие токи нагрузки.

– литий-титанатные (LiTi), отличаются низким номинальным напряжением (2,4 В) и удельной энергоемкостью 70–80 Вт·ч/кг, но быстро заряжаются, имеют широкий температурный диапазон и ресурс 3000–7000 циклов.

Основными общими достоинствами литиевых АБ являются:

- срок службы больше 10 лет;
- высокая энергоемкость;
- отсутствует эффект памяти.

Недостатки литиевых АБ:

- относительно высокая стоимость;
- при физических воздействиях – повреждениях, происходит тепловой разгон с возгоранием;
- при хранении в разряженном состоянии выходят из строя;

– теряют работоспособность, если долго хранятся в разряженном состоянии.

– саморазряд в районе 20 % в месяц (+20°C).

В таблицах 1.1 приведены основные характеристики, рассмотренных типов АБ, а в таблице 1.2 – эксплуатационные характеристики батарей.

В таблице 1.1 показатель стоимости: *тыс.руб/кВт·ч*, где в числителе это энергоемкость АБ, показывающая, какую мощность выдает батарея в течение одного часа не зависимо от значения разрядного тока:

$$\mathcal{E}_{AB} = C_{AB} \cdot U, \text{ Вт} \cdot \text{ч}, \quad (1.1)$$

где C_{AB} – емкость батареи, *А·ч*;

U – номинальное напряжение, *В*.

Важным также является показатель удельной энергоемкости АБ, показывающий, какую мощность отдает батарея массой 1 кг в течение 1 часа:

$$\mathcal{E}_{уAB} = \frac{\mathcal{E}_{AB}}{M_{AB}}, \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг}, \quad (1.2)$$

где M_{AB} – масса аккумуляторной батареи.

В таблице 1.2 приведены показатели по циклу заряд-разряд DOD 80% – это глубина разряда АБ, или степень, до которой она разряжается в течение цикла. Этот параметр влияет на срок службы АБ. Здесь необходимо учитывать тот факт, что неглубокие разряды, использующие за цикл небольшой процент емкости батареи, способствуют увеличению общего ее срока службы.

Из всех типов литий-ионных АБ литий-марганцевые батареи нашли широкое применение в электроинструментах и электротранспорте, кроме того, они находят широкое применение в бытовой технике. Из-за следующих преимуществ: высокая плотность энергии, малый вес, низкий саморазряд, продолжительный срок службы, устойчивы в экстремальных условиях работы, компактные, оптимальная стоимость [127, 131].

Таблица 1.1 – Типы АБ и их основные характеристики

Тип АБ	Номинальное напряжение ячейки, В	Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	Удельная мощность, Вт/кг	КПД, %	Стоимость, тыс.руб/кВт·ч	Токсичность
Свинцово-кислотные (SLA)	2,0	30–40	180–250	70–85	9–13,5	Высокая токсичность (свинец, кислота)
Никель-кадмиевые (NiCd)	1,2	40–60	150–300	70–75	27–54	Очень высокая токсичность (кадмий)
Литий-ионные (Li-ion)	3,6–3,7	150–250	250–2000	85–95	13,5–27	Низкая токсичность
Литий-железо-фосфатные (LiFePO ₄)	3,2–3,3	90–120	1500–2000	90–95	18–31,5	Очень низкая токсичность
Литий-полимерные (Li-Po)	3,7	130–200	>1000	85–90	27–36	Низкая токсичность

Таблица 1.2 – Эксплуатационные характеристики АБ

Тип АБ	Циклы заряд-разряд, DOD 80%	Саморазряд %/месяц	Диапазон рабочих температур °C	Допустимая глубина разряда, %	Время быстрого заряда (0-80%), ч	Максимальный ток (заряд/разряд)	Максимальное напряжение (заряд/разряд), В/ячейка
Свинцово-кислотные (SLA)	200–300	3–20	–20...+50	50	8–16	0,3C/0,5C	2,45/1,8
Никель-кадмиевые (NiCd)	1000–1500	10–20	–40...+60	100	1–2	1,0C/2,0C	1,4/1,0
Литий-ионные (Li-ion)	50–1000	2–8	–20...+60	80	0,5–2	1,0C/3,0C	4,2/3,0
Литий-железо-фосфатные (LiFePO ₄)	2000–7000	1–3	–30...+60	100	0,5–1	3,0C/10C	3,65/2,8
Литий-полимерные (Li-Po)	300–500	2–5	0...+60	80	0,5–1,5	1,0C/10C	4,2/3,0

Внешний вид некоторых типов литий-ионных АБ, применяемых в электроинструментах, приведены на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Внешний вид литий-ионных АБ

В таблице 1.3 приведены электроинструменты, а таблице 1.4 модели дронов, применяемые в сельскохозяйственном производстве. В этих же таблицах приведены основные характеристики АБ этих устройств.

Как видно из таблиц 1.3 и 1.4, что емкость АБ, применяемых в электроинструментах находится в пределах 2–6 А·ч, а в дронах – 5–30 А·ч. При этом, значение номинального напряжения АБ изменяется в основном от 18 до 36 В.

Таблица 1.3 – Электроинструменты и параметры литиевых (Li-ion) АБ

Наименование электроинструмента	Напряжение (В)	Емкость (А·ч)	Вес АБ (кг)	Время работы (ч)
1. Дрели, шуруповерты	18–24	2–6	0,6–0,9	0,5–1,5
2. Секаторы и садовые ножницы	18–26	2,5–5	0,5–1,0	1,0–3
3. Триммеры	18–36	2–5	0,6–1,2	0,5–3
4. Перфораторы	18–54	3–5	0,7–1,0	1,5–2,5
5. Цепные пилы	36–40	2,6–5	0,8–1,1	1,0–2
6. Опрыскиватели	3,7–12	1,2–2,6	0,3–0,7	2–2,5
7. Газонокосилки	36–56	4–5	2–3	0,4–0,7

Таблица 1.4 – Модели дронов и параметры литиевых (Li-ion) АБ

Модели дронов	Напряжение (В)	Емкость (А·ч)	Вес АБ (кг)	Время работы (мин)
1. DJI Agras T40	22,2	30	4,5	24
2. DJI Mavic 3	15,4	5	0,5	43
3. XAG V40	22,2	20	3,2	18
4. Parrot Bluegrass	14,8	4,5	0,4	25
5. Hubsan AgroDrone	22,2	10	1,8	30

Важным показателем является время заряда АБ, которое определяется по формуле:

$$t_{зАБ} = \frac{C_{АБ} U_{И}}{P_{И} \eta_{ЭС}}, \quad (1.3)$$

где $U_{И}$ – номинальное напряжение источника электроэнергии, В;

$P_{И}$ – мощность источника электроэнергии, Вт;

$\eta_{ЭС}$ – КПД энергетической системы, о.е.

Кроме того, время заряда АБ можно определить, зная величину тока заряда по формуле:

$$t_{зАБ} = \frac{C_{АБ}}{I_3}, \quad (1.4)$$

где $C_{АБ}$ – емкость аккумуляторной батареи, А·ч;

I_3 – ток заряда, А.

Время заряда современных солнечных АБ зависит от комплекса факторов, которые необходимо учитывать при проектировании МЭС. Для полной зарядки современных АБ емкостью от 40 до 200 А·ч требуется от 3 до 10 часов.

На рисунке 1.5 приведены графики определения времени заряда полностью разряженных литиевых АБ, применяемых в электроинструментах и БПЛА от мощности источника электроэнергии $P_{И}$.

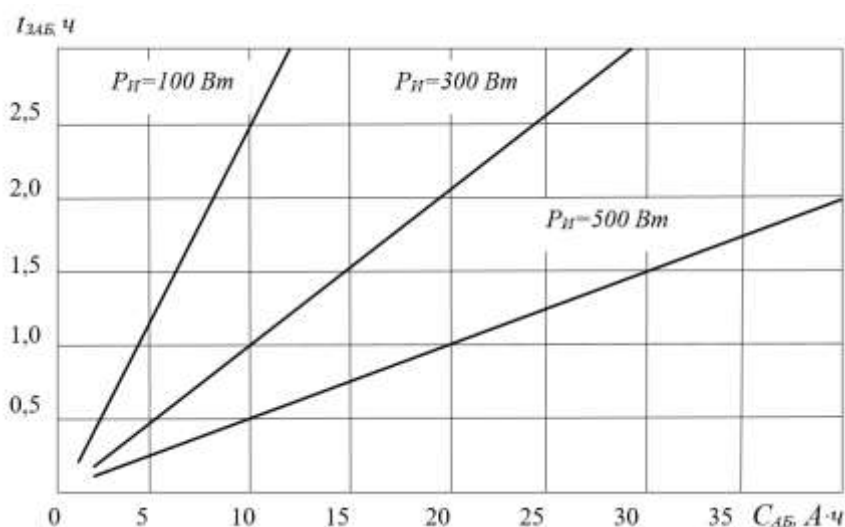


Рисунок 1.5 – Зависимости времени заряда АБ от емкости ($C_{АБ}$) и мощности источника электроэнергии ($P_{И}$) при номинальном значении напряжения батареи $U_{АБ} = 24$ В

Как видно из графиков (рисунок 1.5), чем больше мощность P_{II} , тем быстрее заряжаются АБ, однако наращивание мощности источников электроэнергии приводит к повышению стоимости энергосистемы. Здесь определяющим фактором должно быть требование по времени заряда АБ.

В общем случае основными критериями выбора АБ для электроинструмента являются:

1. Емкость АБ (А·ч), которая определяет, сколько времени инструмент может работать без подзарядки.
2. Напряжение АБ (В), от его уровня зависит мощность инструмента. Высокое напряжение обеспечивает большую мощность, но увеличивает вес и стоимость батареи.
3. Время заряда АБ (ч). Быстрое время зарядки позволяет быстрее вернуться к работе.
4. Ресурс работы АБ определяется количеством циклов заряд-разряд.
5. Вес и габариты, влияют на удобство использования инструмента. Легкие и компактные аккумуляторы удобнее в использовании для длительных работ.
6. Совместимость АБ с электроинструментом.
7. Стоимость АБ является важным фактором, но необходимо учитывать перечисленные выше их характеристики, чтобы обеспечить выполнение необходимого объема работ с использованием электроинструмента или БПЛА.

1.3 Анализ современных достижений в развитии мобильных энергосистем

Широкое применение МЭС небольшой мощности (суммарная мощность источников 7–8 кВт) диктуется основными их преимуществами [1, 2, 23, 24]:

– независимость от инфраструктуры – позволяют использовать энергосистему там, где отсутствует внешняя электросеть;

- мобильность и простота транспортировки (могут размещаться на автоприцепах), что важно для электроснабжения потребителей электроэнергии МФХ, занимающихся сезонным производством продукции;

- бесперебойное электроснабжение потребителей за счет применения нескольких основных и резервного источников электроэнергии;

- удаленный мониторинг и автоматизация – мобильные электростанции, оснащенные интеллектуальными системами, позволяющие осуществлять их управление удаленно, а также проводить мониторинг потребления энергии.

Сегодня для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии нашли применение три основных варианта построения МЭС [7, 10, 13, 52, 57, 58, 59, 121, 125]:

Вариант 1. Ветро-дизельные электростанции, где в качестве накопителя электроэнергии (аварийного источника) применяются аккумуляторные батареи (АБ).

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) является основным источником электроэнергии, дизельная электростанция (ДЭС) выполняет функцию резервного источника электроэнергии, позволяя, при необходимости, покрыть потребности в электроэнергии [8, 18, 51].

Недостатками таких систем являются: непостоянство выработки электроэнергии из-за переменных параметров ветра (скорости и направления); усложнение конструкции – в некоторых системах требуется установка выпрямителей и инвертора, что, кроме того, увеличивает стоимость энергосистемы и усложняет систему управления; повышенные капитальные затраты.

Вариант 2. Энергосистема выполнена на базе солнечных батарей (СБ), являющихся основным источником электроэнергии и АБ – резервный источник энергии. Преимущества: экологичность – солнечные электростанции не загрязняют окружающую среду; экономичность – эксплуатация солнечной электростанции обходится дешевле, чем эксплуатация топливных генераторов; гибкость применения – адаптированы под конкретные потребители

электроэнергии, а также могут содержать дополнительные источники электроэнергии, например, ВЭУ [57, 58, 59].

Вариант 3. Система включает возобновляемые источники СБ и ВЭУ, топливные генераторы (дизельные или бензоэлектростанции) и АБ. Топливные генераторы используются как резервные источники электроэнергии. Структурная схема такой МЭС представлена на рисунке 1.6. Заряжать АБ можно от ВИЭ и ДЭС. К шине гарантированного питания Ш подключаются потребители переменного тока.

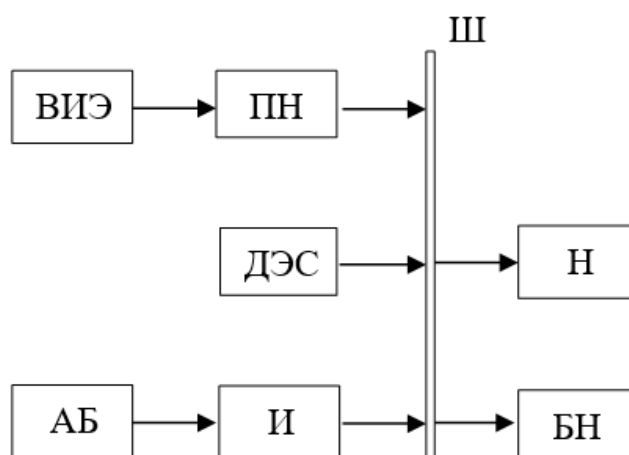


Рисунок 1.6 – Структурная схема МЭС

Основным источником электроэнергии являются ВИЭ. По условиям устойчивости МЭС, определяемым соотношением мощностей ДЭС и ВИЭ, мощность последних не должна превышать 50 % от мощности ДЭС. При низком потенциале ВИЭ источников электроэнергии для нагрузки является ДЭС. Использование ВИЭ как основного источника электроэнергии позволяет экономить дизельное топливо и увеличить ресурс работы ДЭС [95, 99].

В режиме раздельной работы преобразователи напряжения ПН имеют относительно большую установленную мощность. Мощность ВИЭ соответствует номинальной мощности нагрузки Н, поэтому при низком потреблении энергии избыточная электроэнергия расходуется на заряд АБ, а после их заряда ее потребляет балластная нагрузка БН. В качестве БН, как правило, используется осветительная нагрузка, электрообогреватели воды и т. п., приме-

нение которых, повышает эффективность технологических процессов или улучшает условия жизнедеятельности обслуживающего персонала МФХ.

Преобразователь напряжения ПН (рисунок 1.6) выполняет также функцию стабилизатора напряжения. Изменения потребления электроэнергии нагрузкой Н от ВИЭ демпфируется энергией, запасенной АБ, что, кроме того, позволяет уменьшить количество запусков ДЭС.

Для, рассматриваемой МЭС, предусмотрена параллельная работа ВИЭ и ДЭС на общую нагрузку, а также возможность подключать АБ через инвертор И к шине гарантированного питания Ш.

Основными недостатками рассмотренных вариантов построения МЭС является отсутствие шины гарантированного питания постоянного тока, а также относительно большая масса и габариты энергооборудования.

В [42] предложено структурно-схемное решение МЭС, содержащей шины гарантированного питания постоянного и переменного тока Ш1 и Ш2 соответственно (рисунок 1.7).

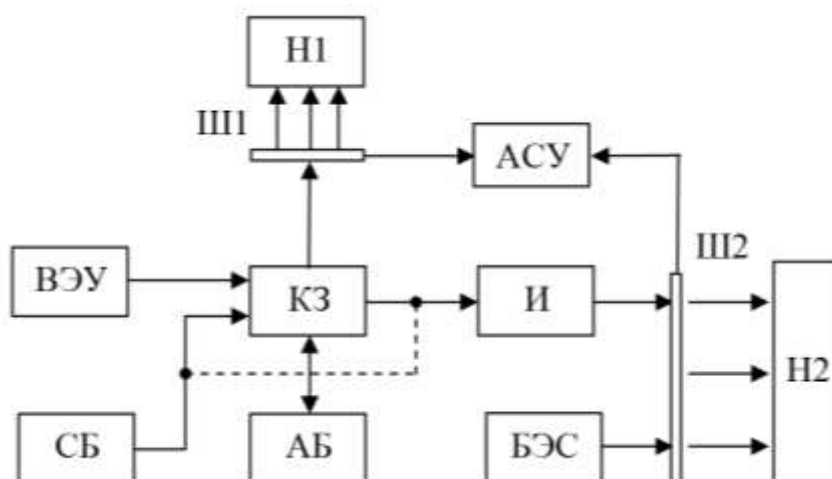


Рисунок 1.7 – Структурная схема МЭС с шинами гарантированного питания постоянного и переменного тока Ш1 и Ш2 соответственно

Особенностью этой схемы является наличие автоматической системы управления (АСУ), которая посредством коммутационных аппаратов (на рисунке 1.7 не показаны) изменяет структуру системы по заданному алгоритму, учитывающему потенциал ВИЭ и величину нагрузки. АСУ, кроме того, через

контроллер заряда КЗ осуществляет контроль параметров источников электроэнергии. В рассматриваемой схеме бензоэлектростанция является резервным источником электроэнергии для потребителей переменного тока.

Как известно, одним из важных технических характеристик МЭС являются массогабаритные показатели. Минимизация массогабаритных показателей в структурном решении МЭС, приведенном на рисунке 1.7 достигается за счет рационального выбора мощности возобновляемых и традиционных источников энергии и адаптивного управления режимами работы источников электроэнергии посредством АСУ с учетом приоритета нагрузки.

Важным функциональным элементом в составе МЭС является солнечный автономный инвертор, обеспечивающий электроэнергией потребители переменного тока [92, 98].

Сегодня широко распространены гибридные солнечные инверторы (СИ) – это усовершенствованные многофункциональные устройства, сочетающие функции инвертора, контроллера заряда АБ от СБ и зарядного устройства для АБ, обеспечивающего бесперебойное электроснабжение потребителей с возможностью выбора приоритета зарядки и нагрузки [35, 53, 69].

Несмотря на наблюдаемую тенденцию к переходу на бестрансформаторные СИ, при их выборе необходимо провести сравнение основных достоинств и недостатков трансформаторных и бестрансформаторных СИ.

В общем случае бестрансформаторные СИ используются для нагрузки без пусковых токов и не требовательны к форме напряжения. Для электродвигательной нагрузки необходимо использовать трансформаторные СИ, которые имеют, кроме того, синусоидальную форму выходного напряжения. Здесь нужно также учитывать следующие факты [101, 102]:

- квазисинусоидальная форма напряжения повышает уровень потерь;
- трансформаторные СИ имеют более высокие показатели надежности, поскольку они имеют меньшее количество коммутационных электронных устройств;

– КПД трансформаторных СИ при одной и той же мощности на 1–2 % ниже.

Анализ технических характеристик современных однофазных СИ компаний СВАРОГ, ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА, SUNLIFE, AsmePower и др. показал, что их входное напряжение зависит от мощности и составляет 12 В мощностью до 2 кВт, 24 В – мощность от 2 до 5 кВт, 48 В от 5 кВт и выше. При этом, стоимость трансформаторных СИ в зависимости от мощности примерно в 1,5–2 раза больше стоимости бестрансформаторных инверторов и для однофазных СИ в среднем составляет:

- 24 тыс. руб для СИ мощностью 1 кВт;
- 40 тыс. руб для СИ мощностью 3 кВт;
- 75 тыс. руб для СИ мощностью 5 кВт.

При этом, в зависимости от производителей СИ масса бестрансформаторных составляет:

- 3,5–5 кг мощностью 1 кВт;
- 7–15 кг мощностью 3 кВт.

Важным функциональным элементом МЭС является зарядное устройство, функции которого выполняют современные гибридные солнечные СИ. Сегодня известны также технические решения многофункциональных (многоканальных) зарядных устройств (ЗУ), которые могут заряжать АБ с напряжениями 6, 12 и 24 В, токами 40 А. Как правило, источники питания переменного тока 220 В (рисунок 1.8). Ресурс работы современных бестрансформаторных ЗУ превышает 10 тыс. ч [117, 124, 128, 130].

Основные недостатки многоканальных ЗУ:

– для функционирования в полевых условиях необходим источник напряжения переменного тока 220 В (бензоэлектростанция, а если применяются ВИЭ, то и инвертор), что значительно ухудшает технико-экономические показатели МЭС);

- каналы заряда АБ настроены на номинальные напряжения 6, 12, 24 В (как видно из таблиц 1.3 и 1.4 напряжение АБ электроинструмента и БПЛА изменяется в широких пределах от 18 до 56 В);
- повышенная чувствительность к качеству напряжения источника питания (скачки напряжения или высокий уровень электромагнитных помех могут вывести из строя сложное электронное устройство);
- низкий КПД, который зависит от конструктивных особенностей и режимов работы, изменяющийся в пределах 60–90 %;
- одновременный заряд, как правило, АБ с одним номинальным значением напряжения (для других номиналов, необходимо изменять режим работы);
- высокая стоимость (3-х каналные ЗУ Комета-С со встроенной нагрузочной вилкой для диагностики АБ – 99 тыс. руб.);
- дешевые модели имеют небольшой ресурс работы.



Рисунок 1.8 – Многоканальные зарядные устройства АБ

Неправильно выбранное ЗУ может привести к перегреву АБ, их повреждению или даже к взрыву. Требования к ЗУ для Li-ion аккумуляторов включают параметры, конструкцию и безопасность.

Основные требования к ЗУ литиевых АБ [124, 126, 131]:

- выходное напряжение должно соответствовать вольтажу заряжаемой АБ;
- зарядный ток должен не превышать 5С в режиме быстрой подзарядки и 1С в режиме бережного заряда;

- алгоритм заряда должен проходить в два этапа: на первом этапе подзарядка с постоянным током и растущим напряжением, а на этом этапе накапливается около 85 % емкости. Когда напряжение достигло установленного максимума, ток медленно уменьшается до нуля, при постоянном напряжении происходит окончательный набор емкости;
- погрешность напряжения должна быть в пределах от 0,05 до 0,1 В;
- автоматически прекращают подзарядку при достижении напряжения 4,2 В на ячейку;
- поддерживать одинаковый заряд для всех ячеек АБ, для предотвращения перегрева;
- должны быть предусмотрены защиты от перегрева, переплюсовки, короткого замыкания, перезаряда;
- автоматическое отключение ЗУ после завершения зарядки;
- оптимальное значение уровня разряда не более 20 % (для продления ресурса работы).

В последнее время значительно улучшились эксплуатационно-технические характеристики высокоскоростных электрических машин, поэтому актуальным является направление применение в составе МЭС электромашинных преобразователей электроэнергии [9, 42, 46, 68].

1.4 Перспективы высокоскоростных электромашинных преобразователей в составе мобильных энергосистем

Одним из направлений, позволяющим улучшить массогабаритные показатели (МГП) энергооборудования и повысить эффективность МЭС является применение в их конструкции высокоскоростных электромашинных преобразователей (ВЭМП) электроэнергии напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока, где в качестве источника электроэнергии использовать АБ, заряд которой осуществлять посредством ВИЭ (солнечных батарей и ветроэнергетической установки) [4, 38, 85].

ВЭМП, выполненные на современных бесконтактных электрических машинах, имеют следующие преимущества [89, 107]:

- ресурс работы до капитального ремонта электрических машин превышает 50 тыс. ч. (около 6 лет непрерывной работы), а для некоторых типов машин он достигает 80 тыс. ч. (9 лет);
- КПД электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов небольшой мощности (до 3 кВт) достигает 95 %;
- улучшенные массогабаритные показатели – при двухкратном увеличении скорости вращения ротора практически в 2 раза увеличивается генерируемая мощность;
- инерционность преобразователя позволяет системе стабилизации удерживать номинальные значения параметров электроэнергии несколько секунд при отключении питающего напряжения;
- пониженный уровень вибраций.

Кроме того, ВЭМП имеют следующие достоинства:

- генерируют идеальное выходное синусоидальное напряжение, без шумов, связанных с работой других потребителей сети;
- обеспечивают гальваническую развязку между входными и выходными цепями;
- фильтруют скачки тока при резком изменении нагрузки или кратковременном отключении источника напряжения за счет инерции ротора;
- простота конструкции и обслуживания.

Важным преимуществом ВЭМП является его инерционность, что позволяет обеспечивать бесперебойное электроснабжение потребителей электроэнергии при переходе питания электромашинного преобразователя от одного источника к другому, а также поддерживать номинальное значение напряжения при дестабилизирующих факторах, возникающих в нагрузке.

Практическое значение для МЭС имеет ВЭМП преобразующий напряжение постоянного тока в трехфазную систему напряжений, поскольку основными источниками электроэнергии для автономной электростанции яв-

ляются СБ и АБ, кроме того, ВЭУ на малых мощностях также генерируют напряжение постоянного тока. Кроме того, что на повышенной частоте вращения вала сам по себе ВЭМП имеет небольшие габариты, но при этом, улучшается качество выходного напряжения постоянного тока на выходе выпрямителей (источников заряда АБ), из-за повышенных значений частоты переменного тока. Что же касается электроснабжения МЭС потребителей переменного тока промышленной частоты, то для этой цели необходимо использовать статические преобразователи с промежуточным высокочастотным преобразованием или непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) [69].

Согласно [54] масса электрической машины пропорциональна ее мощности P , взятой в степени 0,75, и обратно пропорциональна частоте вращения n взятой в степени 0,5:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P^{0,75}}{n^{0,5}}. \quad (1.5)$$

Предложенным упрощенным подходом расчета массы бесконтактных электрических машин можно воспользоваться на этапе проектирования МЭС и оценки ВЭМП. На рисунке 1.9 приведен график зависимости массы M от мощности электрической машины P и частоты вращения ротора n .

Сегодня в БПЛА широко применяются бесконтактные (бесколлекторные) электродвигатели серии ХМ6360ЕА-V3. Конструктивно они содержат постоянные магниты, размещенные на роторе, и три статорные обмотки. Внешний вид электродвигателя с указанием габаритных размеров приведен на рисунке 1.10.

Основные характеристики электродвигателя серии ХМ6360ЕА-V3:

- мощность – 3120 Вт;
- номинальное напряжение питания постоянного тока 24,36 В;
- максимальный ток – 130 А;
- частота вращения ротора – 6420, 7400 об/мин;

- вес – 630, 650 гр;
- стоимость 22,49 тыс. руб.

Как видно из основных характеристик: электродвигатель серии ХМ6360ЕА-V3 имеет значительно ниже массу, чем показали теоретические расчеты (см. рисунок 1.9).

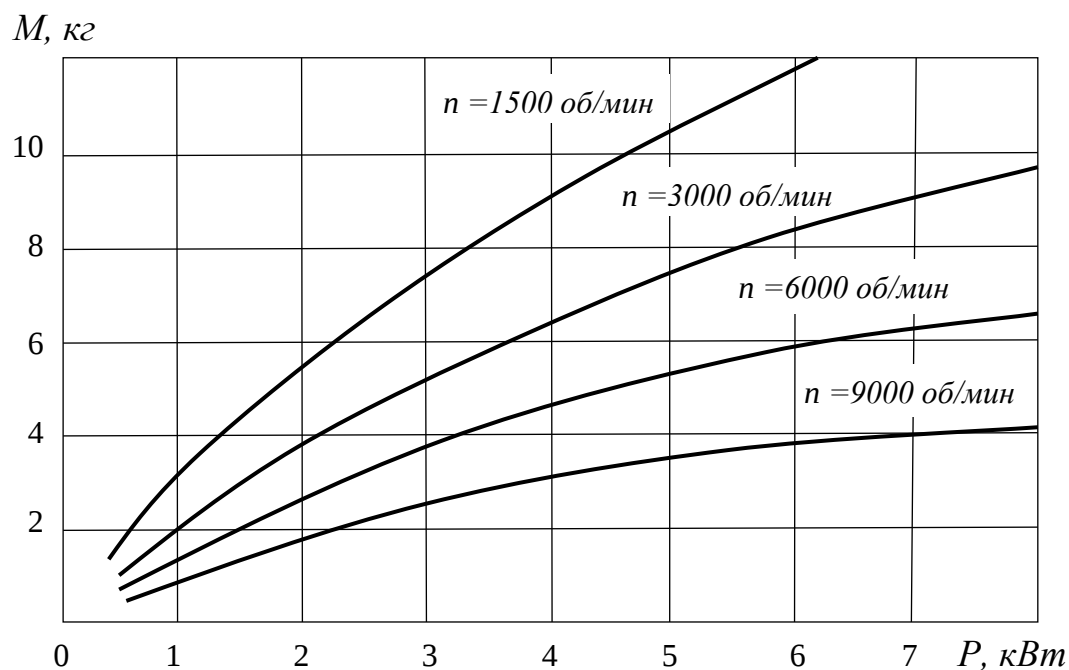


Рисунок 1.9 – График зависимости массы M бесконтактных электрических машин от мощности P и частоты вращения ротора n



Рисунок 1.10 – Внешний вид электродвигателя серии ХМ6360ЕА-V3

Бесконтактный электродвигатель серии ХМ6360ЕА-V3 работает по принципу магнитного взаимодействия. Постоянные магниты создают крутящий момент, который приводит в движение ротор. Поскольку одно из важных свойств электрических машин их обратимость, то электродвигатель может работать в генераторном режиме, для этого необходим привод, осуществляющий вращение ротора.

Если валы двух электродвигателей соединить через муфту, то один из них может работать в двигательном режиме от источника напряжения постоянного тока, а второй генерировать трехфазную систему напряжений переменного тока.

На этапе проектирования ВЭМП целесообразно провести расчет их основных характеристик. Этот расчет имеет особенности, связанные, прежде всего, с высокой скоростью вращения ротора, что накладывает ограничения на предельно допустимые параметры электрических машин. К этим параметрам относятся предельно допустимое значение частоты вращения n_{max} , предельно допустимое значение окружной скорости v_{max} и предельная мощность S_{max} .

Предельно допустимые значения частоты вращения n_{max} определяются в основном показателями подшипников и прочностными характеристиками ротора. Современные радиальные шариковые подшипники производства SKF и FAG имеют предельную частоту вращения 20 000 об/мин, а специальные высокоскоростные серии – до 30 000 об/мин. При этом в гибридных подшипниках с керамическими шариками частота вращения на 20–50 % выше, чем у стандартных стальных подшипников.

В современных высокоскоростных машинах окружная скорость ротора v_{max} должна соответствовать прочностным характеристикам ротора. Как правило, при применении бесконтактных электрических машин (БЭМ) в транспортных системах электроснабжения, где частота тока жестко не фиксируется, основным показателем оптимизации является удельная масса, ограниче-

ния, связанные с прочностью ротора, могут приближенно вычисляться по формуле:

$$n_{\max} = \frac{C_{\Pi}}{D^{\nu}}, \quad (1.6)$$

где D – внутренний диаметр статора;

C_{Π} – постоянная, определяемая прочностными свойствами материала ротора;

ν – показатель, зависящий от его конструктивного исполнения (наличия консольных выступов, вида бандажей и т. д.). Для короткозамкнутого ротора при заданном значении $v_{\max}$, $\nu = 1$.

Ротory высокоскоростных машин короткозамкнутые, если известно значение внутреннего диаметра активной части машины, тогда предельная окружная скорость определяется по формуле [12, 40]:

$$v_{\max} = \frac{\pi D n_{\max}}{60}. \quad (1.7)$$

Более точно предельную окружную скорость БЭМ можно определить из формулы:

$$D = \sqrt{\frac{S}{\pi \alpha_p \lambda A B_{\delta} g_{\max}}}, \quad (1.8)$$

где S – полная мощность электрической машины;

λ – геометрический фактор, для классических машин это отношение длина активной части машины к ее диаметру ($\lambda = l / D$). Для радиального потока рациональное значение для БЭМ зависит от числа пар полюсов p и определяется по формуле $\lambda \approx 0,8 p^{-0,5}$;

A и B_{δ} – линейная нагрузка и магнитная индукция в воздушном зазоре соответственно (для БЭМ с принудительным воздушным охлаждением $j \approx 10 \div 16 \text{ А/мм}^2$, $A \approx (2 \div 5) 10^4 \text{ А/м}$, магнитная индукция в зазоре изменяется в пределах $B_{\delta} \approx 0,5 \div 1 \text{ Тл}$);

$\alpha_p = 0,6 - 0,8$ – коэффициент полюсного перекрытия.

По заданной скорости U_{max} , величина которой связана с допустимыми механическими нагрузками в роторе, определяется предельная мощность БЭМ по формуле:

$$S_{max} = \frac{60^2}{\pi^2} \alpha_p \lambda A B_\delta g_{max}^3. \quad (1.9)$$

Важный факт, касающийся многоагрегатных систем. Когда удельная масса БЭМ, работающих на максимально допустимой скорости n_{max} возрастает, из-за увеличения размеров активной части машины. Возникает ситуация, когда вместо одной машины целесообразно применить две машины, но с той же суммарной мощностью. Это связано с тем, что при фиксированной скорости U_{max} и при увеличении диаметра активной части машины D необходимо уменьшать предельно допустимые обороты ротора БЭМ n_{max} , а возрастание мощности S происходит медленнее, чем рост массы. Однако с другой стороны с учетом зависимости (1.9), чем больше частота вращения ротора электрической машины, тем меньше предельная мощность генератора. Это очевидно, поскольку увеличение частоты вращения при постоянном значении скорости сопровождается уменьшением размеров БЭМ.

Рассмотренные формулы раскрывают особенности расчета БЭМ и могут использоваться на этапе проектирования для предварительной оценки возможностей применения различных типов БЭМ в составе ВЭМП мобильной энергосистемы.

Важный факт. Иногда выгоднее занизить некоторые показатели ВЭМП, для того чтобы улучшить, к примеру, массогабаритные показатели (МГП) статических преобразователей электроэнергии, за счет повышенной частоты генерируемого напряжения ВЭМП [31].

Таким образом, важным является вопрос исследования электромагнитной совместимости основных функциональных элементов (ФЭ) МЭС при совместной работе с ВЭМП.

1.5 Выводы, цель и задачи исследований

Проведен анализ востребованности МЭС в сельскохозяйственном производстве. Показано, что сегодня в фермерских хозяйствах, удаленных от внешней энергетической системы, широко применяется электроинструмент, работающий на АБ. Кроме того, актуальным является применение БПЛА, также работающих от АБ, для мониторинга состояния растений и почвы, точечного внесения удобрений.

Основными недостатками применяемых традиционных АИЭ, выполненных на топливных генераторах являются повышенные эксплуатационные затраты, связанные, прежде всего, с расходом топлива, а также с техническим обслуживанием, относительно небольшой ресурс необслуживаемой работы.

Рассмотрены основные характеристики аккумуляторных батарей разных типов их достоинства и недостатки. Показано, что из всех типов литий-ионных АБ литий-железо-фосфатные батареи сегодня нашли широкое применение в электроинструментах и электротранспорте, а также в бытовой технике. Из-за следующих преимуществ: высокая плотность энергии, малый вес, низкий саморазряд, продолжительный срок службы, устойчивы в экстремальных условиях работы, компактные, оптимальная стоимость.

Рассмотрены основные недостатки многоканальных электронных ЗУ и современные требования, предъявляемые к ЗУ литий-ионных АБ.

Проведен анализ особенностей работы и недостатки структурно-схемных решений МЭС и предложено, для повышения энергоэффективности и эргономичности в их составе применять ВЭМП. Кроме того, приведены аналитические выражения для расчета предельно допустимых значений частоты вращения n_{max} , окружной скорости v_{max} и мощности S_{max} высокоскоростных машин, которые позволят на этапе проектирования МЭС проводить предварительную оценку возможностей применения различных типов БЭМ в составе ВЭМП мобильной энергосистемы.

Рабочая гипотеза состоит в том, что проведение научных исследований по определению рациональных параметров и режимов работы преобразователей электроэнергии с использованием ВЭМП, позволит получить соответствующие закономерности, позволяющие разрабатывать энергоэффективные и эргономичные функциональные элементы МЭС.

Целью диссертационного исследования является обоснование параметров и режимов работы высокоскоростных электромашинных преобразователей 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 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 ВИЭ на базе ВЭМП.

2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ МОБИЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЭЛЕКТРОМАШИННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО РАБОТЫ

2.1 Разработка структурной схемы мобильной энергосистемы на высокоскоростном электромашинном преобразователе электроэнергии

Таким образом, если в фермерских хозяйствах будут применяться аккумуляторные инструменты, то с одной стороны – это позволит повысить эффективность сельскохозяйственного производства, а с другой стороны необходимо модернизировать структуру МЭС, обеспечивающей электроэнергией фермерские хозяйства поскольку соотношение потребителей постоянного тока, с учетом АБ, в сравнении с потребителями переменного тока, увеличится. Проводился анализ структурно-схемных решений электромашинных преобразователей электроэнергии: особенностей работы, преимуществ и недостатков [73–78], что позволило разработать энергоэффективную автономную систему электроснабжения на базе электромашинного преобразователя электроэнергии постоянного тока в напряжение переменного тока.

На рисунке 2.1 приведена структурная схема МЭС, выполненная с использованием ВЭМП. За базовую, выбрана схема станции, показанная на рисунке 1.7.

В состав МЭС (рисунок 2.1) 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 и М2, причем электрическая машина М1 работает в двигательном режиме, а электрическая машина М2 в генераторном режиме; РС – регулятор скорости; ПЧ – преобразователь частоты; РН – регулятор напряжения (управляемый выпрямитель),

выполняющий функции зарядного устройства АБ с разными номинальными значениями напряжения; К1–К10 – коммутационные аппараты; САУ – система автоматического управления; Ш1 и Ш2 – шины переменного тока повышенной и промышленной частоты соответственно; Ш3–Ш5 – шины постоянного тока с разными уровнями напряжения.

В схеме МЭС, приведенной на рисунке 2.1, может быть предусмотрен ввод для подключения внешней сети через К3. Кроме того, к вводу, к которому подключается внешняя сеть могут быть подключены резервные источники – топливные генераторы.

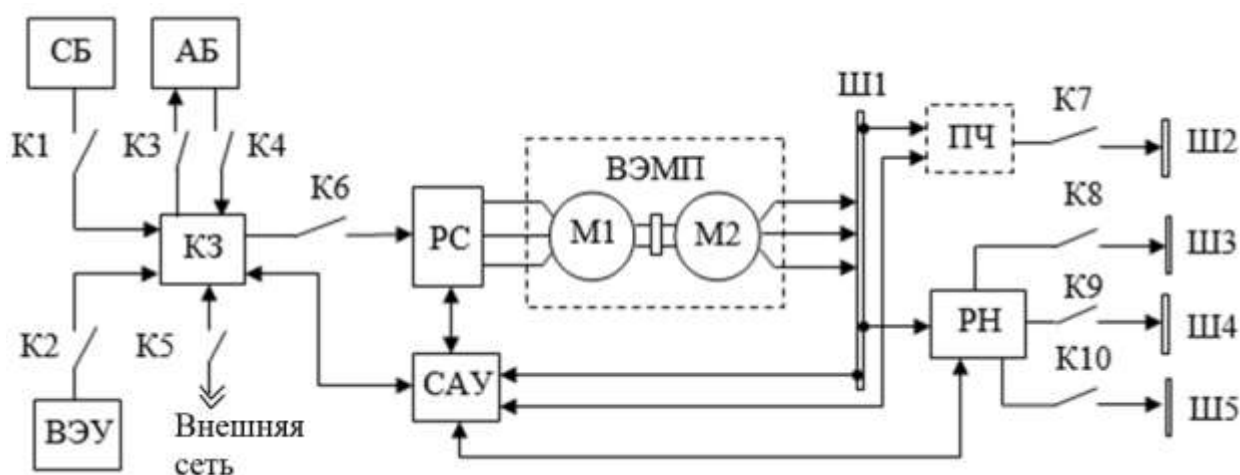


Рисунок 2.1 – Структурная схема МЭС на базе ВЭМП

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

Контроллер заряда КЗ осуществляет следующие автоматические функции:

- контроль параметров электроэнергии источников ВИЭ (СБ, ВЭУ) и базовой АБ;
- обеспечивает непрерывную подачу электроэнергии на ввод ВЭМП от разных источников электроэнергии, при подключении потребителей электроэнергии;

- оптимизирует производительность ВИЭ (солнечных батарей и ветроэнергетической установки);
- регулирует процесс заряда АБ мобильной энергосистемы, защищая ее от перезаряда или глубокого разряда.

Система автоматического управления САУ осуществляет контроль электрических параметров МЭС и изменение алгоритмов работы контроллера заряда КЗ, регуляторов РС и РН в дистанционном режиме. Кроме того, осуществляет защиту функциональных элементов МЭС в аварийных ситуациях (при КЗ и перегрузках).

Известно, что выходное напряжение электрической машины М2, работающей в генераторном режиме прямо пропорционально скорости вращения ротора, поэтому его стабилизации обеспечивается регулятором скорости РС. Изменение частоты тока ВЭМП, который является источником электроэнергии для преобразователя частоты ПЧ и регулятора напряжения РН не оказывает влияние на работу статических преобразователей, поскольку их локальные системы управления, удерживают номинальные параметры электроэнергии на выходе преобразователей, независимо от изменения входной частоты тока [48, 70].

Преобразователь частоты ПЧ представляет собой электронное устройство с промежуточным высокочастотным преобразованием, содержащее выпрямитель и инвертор напряжения. В зависимости от требований потребителей мощность ПЧ может находиться в пределах 1,0–2,0 кВт. При этом, масса преобразователя не превышает 1,5 кг, а КПД современных инверторов напряжения при промежуточной частоте преобразования 20–50 кГц достигает 93 % [42, 69].

Принцип работы МЭС. Заряд базовой АБ мобильной энергосистемы осуществляется солнечными батареями СБ и (или) роторной ветроэнергетической установкой (ВЭУ) роторного типа. Базовая АБ с номинальным напряжением постоянного тока 24 В является источником электроэнергии для ВЭМП на вход которого (электрическая машина М1) электроэнергия по-

ступает через регулятор скорости РС. Регулятор скорости РС посредством ШИМ преобразует напряжение постоянного тока в трехфазную систему напряжений. Частота вращения ротора электрических машин М1 и М2 может изменяться от 6000 до 8000 об/мин. К шине Ш1 подключается трехфазная система напряжений переменного тока в номинальном режиме: линейное напряжение 42 В, частота тока $f = 1000$ Гц.

Заряд базовой АБ и разряд ее на ВЭМП может происходить одновременно.

При низком потенциале ВИЭ контроллер заряда КЗ посредством САУ включает бензоэлектростанцию БЭС, осуществляющую заряд базовой АБ.

Регулятор напряжения РН поддерживает номинальное выходное напряжение, необходимое для заряда АБ, при дестабилизирующих факторах, возникающих на шине Ш1, а преобразователь частоты ПЧ номинальные параметры выходного напряжения и промышленной частоты тока, в том числе, при изменении параметров нагрузки переменного тока.

К выходу регулятора РН (шинам Ш3–Ш5) также могут подключаться другие потребители постоянного тока (осветительная нагрузка, электропривод постоянного тока и т. п.).

При выборе базовой АБ для МЭС необходимо учитывать следующие факты: мощность и масса зарядных устройств для литиевых батарей зависят от типа аккумулятора, схемы сборки и других параметров. Важно учитывать, что для литий-ионных (Li-ion) и литий-железо-фосфатных (LiFePO₄) аккумуляторов подходят разные зарядные устройства [114, 118].

Для Li-ion АБ необходимы зарядные устройства с выходным напряжением, соответствующим вольтажу заряжаемой АБ, и зарядным током, не превышающим $5C$, где C – емкость АБ. В режиме быстрой подзарядки и $1C$ в режиме бережного заряда [124].

Для LiFePO₄ аккумуляторов подходят более мощные зарядные устройства, позволяющие ускорить процесс зарядки, если же превышать рекомендованные производителем токи, то это приведет к ускорению износа АБ.

Оптимальная величина зарядного тока для Li-ion элементов – 0,5–1 С.

К примеру:

- для АБ емкостью $10 \text{ А} \cdot \text{ч} - 0,5\text{С} = 5 \text{ А} (0,5 \times 10)$;
- для АБ емкостью $50 \text{ А} \cdot \text{ч} - 0,5\text{С} = 25 \text{ А}$.

Применение в составе МЭС современных средств автоматизации, реализуемых посредством системы автоматического управления САУ и контроллера заряда КЗ, предполагает разработку алгоритма управления работой МЭС.

На рисунке 2.2 приведен алгоритм работы системы автоматического управления САУ мобильной энергосистемы, приведенной на рисунке 2.1. Основная задача САУ поддерживать номинальное значение напряжения постоянного тока на входе регулятора скорости РС, обеспечивающее требуемую величину вращающегося момента вала ВЭМП для выработки электроэнергии для нагрузки, которой являются регулятор напряжения РН и преобразователь частоты ПЧ.

САУ, в том числе через контроллер заряда КЗ, осуществляет контроль следующих параметров:

- мощность трехфазной нагрузки переменного тока повышенной частоты (шина Ш1) – $P_{Ш1}$ и мощность на шинах $P_{Ш2} - P_{Ш5}$;
- мощность базовой АБ – $P_{АБ}$, включая значения напряжения и тока ($U_{АБ}$ и $I_{АБ}$), а также мощность допустимого разряда $P_{АБmin}$ и мощность предельно допустимого заряда батареи $P_{АБmax}$;
- мощность генерации электроэнергии СБ – $P_{СБ} (U_{СБ} \text{ и } I_{СБ})$;
- мощность генерации электроэнергии ВЭУ – $P_{ВЭУ} (U_{ВЭУ} \text{ и } I_{ВЭУ})$;
- суммарную мощность, генерируемой электроэнергией ВИЭ – $P_{ВИЭ}$;
- мощность бензоэлектростанции БЭС – $P_{БЭС} (U_{БЭС} \text{ и } I_{БЭС})$;
- мощность ВЭМП – $P_{ЭМП} (U_{ЭМП}, I_{ЭМП})$.

САУ в автоматическом режиме может изменять режимы работы регуляторов электромашиного преобразователя РС и РН, а также преобразователя частоты ПЧ.

Алгоритм работы САУ (рисунок 2.2). Исходными данными алгоритма работы САУ (рисунок 2.2) являются параметры: P_H , P_{AB} , P_{CB} , $P_{ВЭУ}$, $P_{БЭС}$. Кроме того, принимаем, что в исходном состоянии МЭС разряжена базовая АБ, т.е. $P_{AB} = P_{CBmin}$ и коммутационные аппараты К1 – К10 отключены (рисунок 2.2). При этом, если $K = 0$, то коммутационный аппарат отключен, а если $K = 1$, то коммутационный аппарат включен. Суммарная мощность нагрузки определяется по формуле:

$$P_H = P_{III} + \Delta P_{ВЭМП}, \quad (2.1)$$

где P_{III} – суммарная мощность одновременно, работающих потребителей с учетом потерь в регуляторах частоты и напряжения ПЧ и РН;

$\Delta P_{ВЭМП}$ – потери электроэнергии в ВЭМП.

Если выполняется первое условие $P_{AB} \leq P_{CBmin}$, САУ формирует сигнал для замыкания контактов К4 и К6, подключая источник напряжения через регулятор скорости РС к ВЭМП, после выхода электромашинного преобразователя на номинальный режим, подключаются потребители электроэнергии посредством коммутационных аппаратов К7–К10, к шинам Ш2–Ш5.

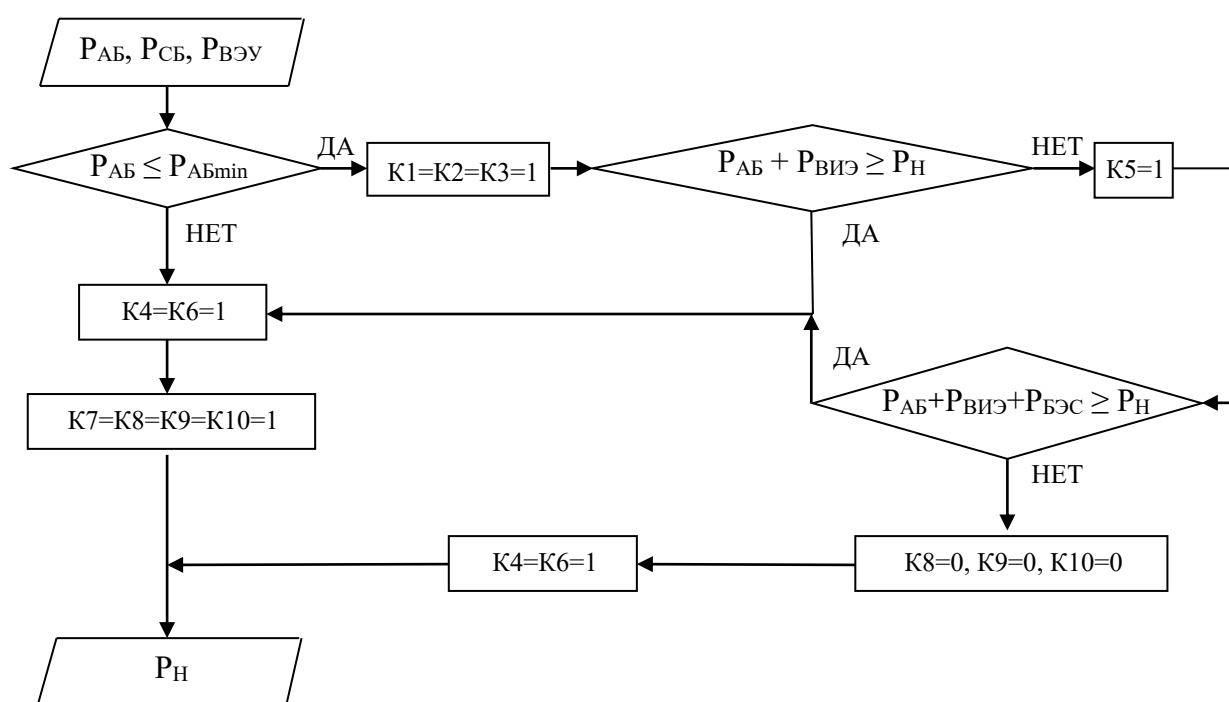


Рисунок 2.2 – Алгоритм работы САУ мобильной энергосистемы на ВЭМП

Если же не выполняется условие $P_{AB} \leq P_{CBmin}$, то САУ формирует сигналы управления и включает коммутационные аппараты К1, К2 и К3, подключая к базовой АБ возобновляемые источники солнечные батареи СБ и ветроэнергетическую установку ВЭУ (рисунок 2.1). Происходит заряд батареи. Когда $P_{AB} + P_{ВИЭ} \geq P_H$, включаются коммутационные аппараты К4 и К6, подключая источники электроэнергии к ВЭМП через регулятор скорости РС. К потребителям через преобразователь частоты ПЧ и регулятор напряжения РН, посредством включения коммутационных аппаратов К7 – К10 поступает электроэнергия от трех источников АБ, СБ и ВЭУ.

Если же условие $P_{AB} + P_{ВИЭ} \geq P_H$ не выполняется, то САУ включает коммутационный аппарат К1, подключая резервный источник электроэнергии бензоэлектростанцию БЭС (рисунок 2.1).

Когда $P_{AB} + P_{ВИЭ} + P_{БЭС} \geq P_H$ потребители будут получать электроэнергию от четырех источников АБ, СБ, ВЭУ и БЭС. Если же не будет выполняться условие $P_{AB} + P_{ВИЭ} + P_{БЭС} \geq P_H$, тогда САУ в соответствии с установленным приоритетом нагрузки будет отключать источник электроэнергии от шин Ш3, Ш4 и Ш5. Таким образом, источники МЭС будут обеспечивать электроэнергией потребители переменного тока промышленной частоты.

Предложенный алгоритма работы САУ повысит эффективность разработки программного аппарата для прошивки микропроцессорной техники.

2.2 Методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи

В качестве базовой АБ мобильной энергосистемы (рисунок 2.1) с учетом проведенного анализа в п. 1.2 основных характеристик разных типов батарей в п. 1.2, выбираем литий-железо-фосфатные ($LiFePO_4$) АБ, КПД которых составляет 90–95%, а удельная мощность 1500–2000 Вт/кг.

Методика определения рациональной мощности источников электроэнергии и параметров базовой аккумуляторной батареи включает следующие этапы;

- 1) определяется потенциал солнечной и ветровой энергетики на территории, где предполагается использование МЭС.
- 2) проводится расчет среднего суточного значения энергии, потребляемой хозяйством в сезон (в период активного функционирования хозяйства).
- 3) определяются мощность, входные и выходные параметры электроэнергии ВЭМП;
- 4) проводится расчет параметров базовой АБ;
- 5) определяются рациональные мощности солнечных батарей и ветроэнергетической установки с учетом потенциала ВИЭ и технико-экономических показателей;
- 6) определение стоимости МЭС.

На первом этапе определяется уровень солнечной радиации и скорость ветровых потоков на территории, где планируется применение МЭС. Информация имеется в метеостанциях. Строятся графики зависимости распределение потенциала солнечной и ветровой энергетики $\mathcal{E}_c = f(t)$ и $V = f(t)$, соответственно, от времени в течение суток (рисунок 2.3).

МЭС будет применять только для заряда АБ электроинструментов и БПЛА. С учетом типовых нагрузок фермерских хозяйств, занимающихся разными видами деятельности, и параметров АБ электроинструментов и БПЛА (таблицы 1.1–1.4) определяется среднее суточное значение емкости базовой АБ. К примеру, суммарная энергия нагрузки составила $W_H \approx 1,5$ кВт·ч, что является средним статистическим показателем для заряда в течение суток АБ большинства хозяйств, удаленных от внешней энергетической системы [11, 42]. В этом случае емкость базовой АБ определяется по формуле:

$$C_{AB} = \frac{W_H}{U_{AB}} = \frac{1500}{24} = 62,5 \text{ А} \cdot \text{ч}. \quad (2.2)$$

С учетом зависимости (1.1) время заряда базовой АБ при мощности источника электроэнергии $P_{II} = 500$ Вт будет составлять около 3 ч., а при мощности источника $P_{II} = 1$ кВт, около 1,5 ч.

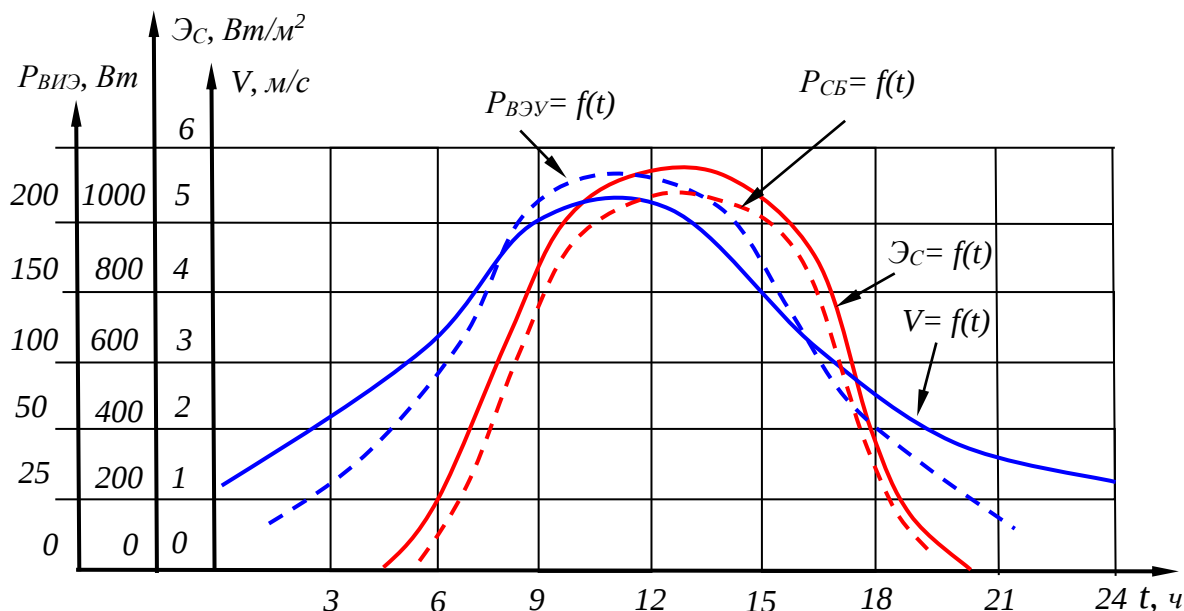


Рисунок 2.3 – Распределение потенциала солнечной и ветровой энергетики суток ($Э_С = f(t)$ и $V = f(t)$) и графики зависимости, вырабатываемой энергии ВЭУ ($P_{ВЭУ} = f(t)$) и солнечной батарей ($P_{СБ} = f(t)$) от времени в течение суток

После определения емкости базовой АБ определяется мощность ВЭМП с учетом; номинального значения входного напряжения постоянного тока $U_H = 24$ В, КПД которое равно 90 % и пиковой мощности нагрузки $P_{НП} = 1,5$ кВт. Для нашего случая мощность электромашинного преобразователя $P_{ЭМП} = 1,65$ кВт.

По значению $P_{ЭМП} = 1,65$ кВт и номинальному ряду электродвигателей серии ХМ6360ЕА-V3 выбираются электрические машины для ВЭМП с ближайшей мощностью, в нашем случае равной 2 кВт. Выходное напряжение ВЭМП регулятором напряжения может регулироваться от 0 до 60 В, а значение тока от 0 до 167 А, частота тока $f = 1000$ Гц.

Следующим этапом является определение мощности солнечных батарей и ветроэнергетической установки МЭС. Расчет целесообразно проводить с учетом, что каждый из этих источников должен обеспечить полный заряд

базовой АБ. Затем, учитывая потенциал ВИЭ (рисунок 2.3) и стоимость производства 100 Вт электроэнергии каждым из источников, перераспределить между ними мощность, обеспечивающей полный заряд базовой АБ, оценивая рациональность с точки зрения технико-экономические показатели системы в комплексе.

Выбираем для МЭС вертикально-осевую ВЭУ (ротор Дарье). ВЭУ этого типа начинают вырабатывать электроэнергию при скорости ветра от 2 м/с. Мощность роторной ВЭУ определяется по формуле [8, 60, 69]:

$$P_{ВЭУ} = 1,3\pi V^3 D^2 H \rho \eta_{\Gamma} K_{ИЭВ}, \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

где V – скорость ветра, м/с;

D – диаметр ротора, м;

H – высота ротора, м;

$\eta_{\Gamma} = 0,9-0,95$ – КПД бесконтактных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов;

$\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ – коэффициент плотности воздуха;

$K_{ИЭВ} = 0,35-0,45$ – коэффициент использования энергии ветра.

С учетом известных значений КПД генератора и коэффициентов формула (2.4) примет вид:

$$P_{ВЭУ} = 1,9V^3 D^2 H, \text{ Вт}. \quad (2.4)$$

Выбираем роторную ВЭУ с параметрами $D = 0,5 \text{ м}$, $H = 1,0 \text{ м}$. Данная установка в среднем за сезон будет вырабатывать электрическую энергию в соответствии с графической зависимостью $P_{ВЭУ} = f(t)$ (рисунок 2.3).

Выбираем СБ с общей площадью панели 1 м^2 и максимальной выработкой электроэнергии мощностью 250 Вт. С учетом потенциала солнечной энергетики, т. е. зависимости $\mathcal{E}_C = f(t)$ (рисунок 2.3) получаем график выработки электроэнергии $P_{СБ} = f(t)$ (рисунок 2.3).

На рисунках 2.4 приведены зависимости стоимости разных типов и производителей СБ и роторных ВЭУ от мощности. Как видно из рисунка 2.4 стоимость роторных ВЭУ при одинаковой, вырабатываемой энергии, в несколько

раз выше стоимости СБ. Однако при выборе мощности ВИЭ необходимо учитывать, что роторные ВЭУ вырабатывают энергию в ночное время (рисунок 2.3). Поэтому с учетом рекомендаций, приведенных в [42], мощность ВЭУ должна составлять 25–30 % от полной мощности необходимой для заряда базовой АБ.

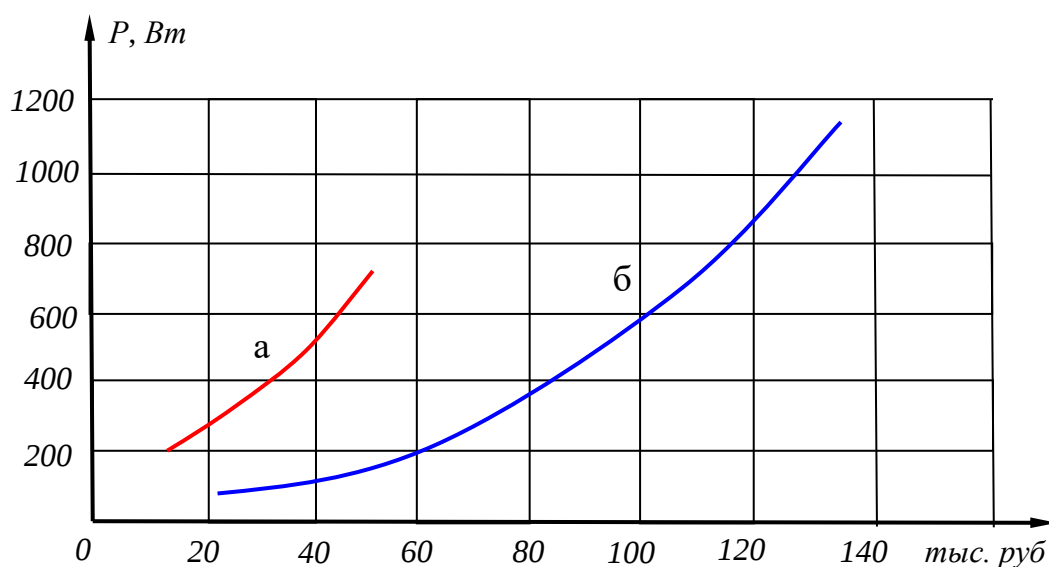


Рисунок 2.4 – Зависимости стоимости роторных СБ (а) и ВЭУ (б) от мощности

Ориентировочная стоимость МЭС можно определить по формуле

$$C_{МЭС} = K_C (C_{ВЭУ} + C_{СБ} + C_{АБ} + C_{ВЭМП}), \quad (2.5)$$

где $K_C = 1,5–1,6$ – коэффициент, учитывающий расходы на пусконаладочные работы, а также накладные расходы.

Ориентировочно стоимость проектируемой МЭС на базе ВЭМП, выполняющая функцию зарядного устройства, с вырабатываемой энергией в сутки 1,5 кВт·ч составляет около 250 тыс. руб. При этом, масса ВЭМП с регуляторами напряжения и оборотов не превышает 4 кг, а масса МЭС с источниками электроэнергии и базовой АБ составляет около 70 кг.

2.3 Теоретические исследования высокоскоростного электромашинного преобразователя и анализ переходных процессов

Для исследования работы ВЭМП в качестве зарядного устройства разработана структурная схема, приведенная на рисунке 2.5.

Принцип работы зарядного устройства на базе ВЭМП (рисунок 2.5). ВЭМП выполнен на базе двух электрических машин М1 и М2, соединенных между собой соединительной муфтой C_M .

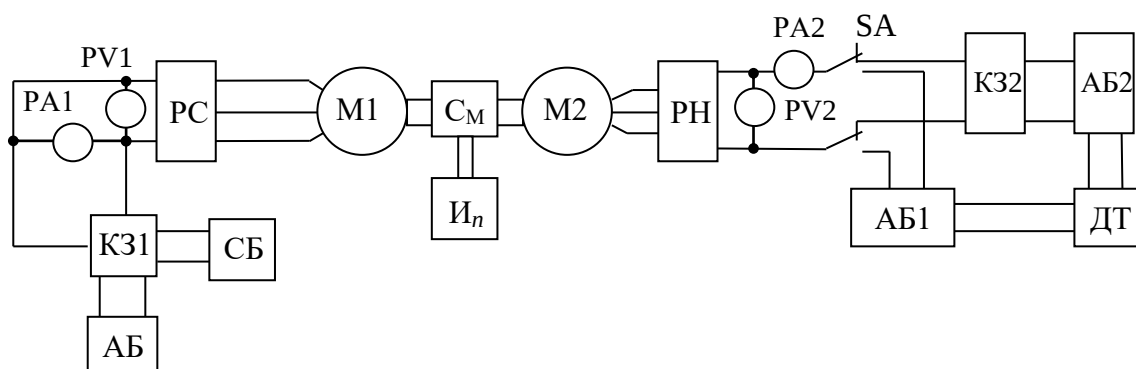


Рисунок 2.5 – Структурная схема зарядного устройства на базе ВЭМП

При этом, машина М1 работает в режиме двигателя, а машина М2 в режиме генератора. Электроэнергия постоянного тока поступает на вход ВЭМП от регулятора скорости РС. Вход регулятора подключен через контроллер заряда К31 с источником напряжения, которым является базовая аккумуляторная батарея АБ. Заряд базовой АБ осуществляет солнечная батарея СБ. Регулятор скорости РС преобразует напряжение постоянного тока в трехфазную систему напряжений посредством ШИМ. Регулирование оборотов осуществляет изменение параметров импульсов ШИМ. Контроль частоты вращения вала ВЭМП осуществляется измерителем оборотов I_n . Генератор представляет собой такую же машину с постоянными магнитами, но имеющий более низкий КВ (отношение частоты вращения к питающему напряжению, единицы измерения об/В). Такое соотношение КВ с двигателем (1/4) позволяет получить более высокий уровень напряжения на генераторе при номинальной частоте вращения приводного двигателя.

С выхода генератора трехфазная система напряжений подается на регулятор напряжения РН, который осуществляет функцию выпрямителя.

К выходу регулятора напряжения РН подключаются для заряда литиевые батареи АБ1 и АБ2. При этом, батарея АБ2 подключается через контроллер заряда КЗ2.

Величина напряжения и тока на входе регулятора скорости РС контролируется вольтметром PV1 и амперметром PA1, а на выходе регулятора напряжения вольтметром PV2 и амперметром PA2.

Переключатель SA позволяет осуществлять коммутации для подключения разных типов АБ: кадмиевых, кислотных и литиевых. При заряде литиевых АБ предусмотрен контроллер заряда КЗ2. Также необходимо контролировать температуру во время заряда АБ посредством датчика температуры ДТ.

На этапе проектирования ВЭМП необходимо провести анализ переходных процессов.

На первом этапе исследований проведен анализ механического движения в двухагрегатном ВЭМП с использованием законов электромеханики. Расчетная схема ВЭМП представлена на рисунке 2.6.

В соответствии с рисунком 2.6 энергия от источника передается к заряжаемой батарее через регулятор скорости электродвигателя, сам электродвигатель, далее через соединительную муфту к генератору и потом через выпрямитель непосредственно к заряжаемой батарее. Часть энергии передается электрическим путем, а другая часть – механическим.

Уравнение движения электропривода для данной системы имеет вид:

$$M_{ДВ} - M_{СТ1} - M_{СТ2} - M_{ГЕН} = J_{СИСТ} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.6)$$

где $M_{СТ1}$, $M_{СТ2}$ – статические моменты, связанные с взаимодействием постоянных магнитов с железом статора;

$J_{СИСТ}$ – момент инерции системы механических составляющих.

ВЭМП может работать в одном из двух режимов – установившемся или переходном. Установившийся режим возникает при равенстве нулю динамического момента. Переходный процесс будет происходить при переходе из одного установившегося режима в другой (рисунок 2.7). Так, например,

как показано на рисунке 2.7 при уменьшении тока заряда система перейдет из установившегося состояния 1 в состояние 2.

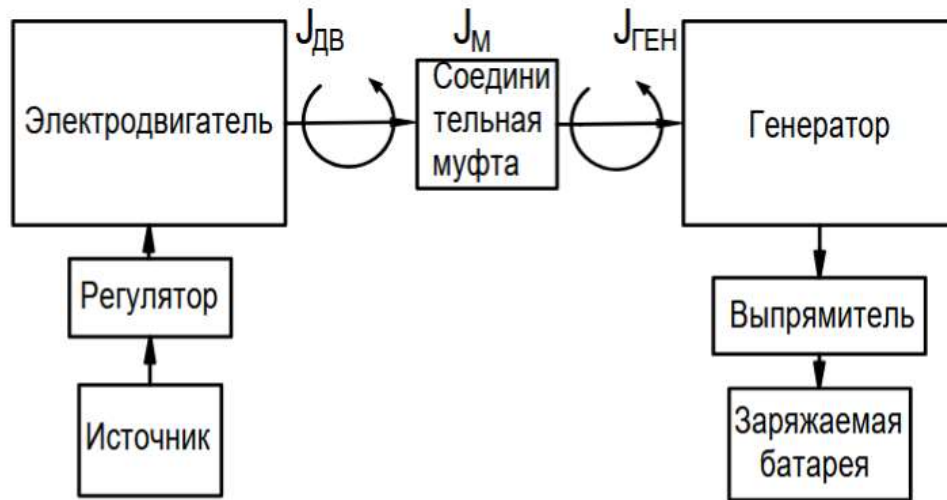


Рисунок 2.6 – Расчетная схема ВЭМП

Так как в системе ВЭМП есть элементы, обладающие механической, электромагнитной и тепловой инерциями, то при переходе из одного состояния в другое возникают соответствующие переходные процессы. Тепловые процессы не будем рассматривать из-за их гораздо большей длительности. В нашем случае механическая и электромагнитная инерционность сопоставимы, и тогда будем рассматривать электромеханический переходный процесс.

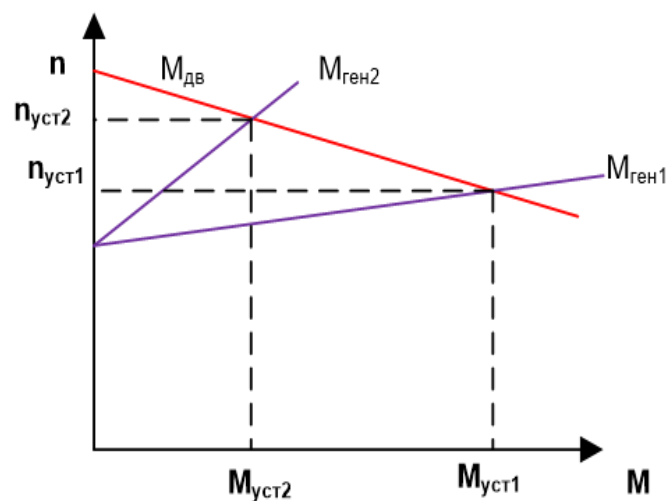


Рисунок 2.7 – Графики механических характеристик системы ВЭМП

В системе ВЭМП уравнение движения электропривода можно описать следующим уравнением:

$$M_{ДВ} - M_{СТ1} - M_{СТ2} - M_{ГЕН} = J_{СИСТ} \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.7)$$

Если принять $M_{СТ1} = M_{СТ2} = M_{СТ}$, то:

$$M_{ДВ} - 2M_{СТ} - M_{ГЕН} = J_{СИСТ} \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.8)$$

Уравнения механических характеристик двигателя и генератора:

$$\begin{cases} M_{ДВ} = \beta \omega_{0ДВ} - \beta \omega \\ M_{ГЕН} = \gamma \omega_{0ГЕН} + \gamma \omega \end{cases} \quad (2.9)$$

где β, γ , – коэффициенты жесткости характеристик $\left(\frac{\Delta M}{\Delta \omega} \right)$ соответственно двигателя и генератора.

Подставив уравнения двигателя и генератора в уравнение движения получим:

$$\beta \omega_{0ДВ} - \beta \omega - 2M_{СТ2} - \gamma \omega_{0ГЕН} + \gamma \omega = J_{СИСТ} \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.10)$$

Проведем преобразования и получим:

$$J_{СИСТ} \frac{d\omega}{dt} + \beta \omega + \gamma \omega = \beta \omega_{0ДВ} - \gamma \omega_{0ГЕН} - 2M_{СТ}, \quad (2.11)$$

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{\beta \omega_{0ДВ} - \gamma \omega_{0ГЕН} - 2M_{СТ}}{\gamma + \beta}, \quad (2.12)$$

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{УСТ}, \quad (2.13)$$

где $T_M = \frac{J_{СИСТ}}{\gamma + \beta}$ – электромеханическая постоянная, с;

$\omega_{УСТ} = \frac{\beta \omega_{0ДВ} - \gamma \omega_{0ГЕН} - 2M_{СТ}}{\gamma + \beta}$ – установившееся значение скорости (точка пересечения характеристик), c^{-1} .

Аналогично получим дифференциальное уравнение для момента:

$$T_M \frac{dM}{dt} + M = M_{УСТ}. \quad (2.14)$$

В нашем случае длительность электромагнитных процессов будет соизмерима с длительностью механических процессов, что связано с малыми инерционными массами подвижных составляющих. Следовательно, в уравнениях механических характеристик двигателя и генератора нужно учесть инерционный характер электромагнитного момента. В связи с этим уравнения механических характеристик будут иметь вид:

$$\begin{cases} M_{ДВ} = \beta\omega_{0ДВ} - \beta\omega - T_{ЭДВ} \frac{dM_{ДВ}}{dt} \\ M_{ГЕН} = \gamma\omega_{0ГЕН} + \gamma\omega - T_{ЭГЕН} \frac{dM_{ГЕН}}{dt} \end{cases}, \quad (2.15)$$

где $T_{ЭДВ}$, $T_{ЭГЕН}$ – электромагнитные постоянные времени соответственно двигателя и генератора ($L_{ДВ}/R_{ДВ}$, $L_{ГЕН}/R_{ГЕН}$), с.

Сделав классические преобразования для таких случаев [39, 46, 95], получим однотипные дифференциальные уравнения для скоростей и моментов двигателя и генератора:

$$T_M T_{\omega} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}, \quad (2.16)$$

$$T_M T_{\omega} \frac{d^2 M}{dt^2} + T_M \frac{dM}{dt} + M = M_{уст}. \quad (2.17)$$

В данных уравнениях электромагнитные постоянные T_{ω} будут являться суммами постоянных регулятора (выпрямителя) и электрической машины:

$$T_{ЭДВ} = T_{РЕГ} + T_{ДВ}, \quad T_{ЭГЕН} = T_{ВЫПР} + T_{ГЕН} \quad (2.18)$$

Постоянной времени регулятора $T_{РЕГ}$ можно пренебречь так как основная составляющая их структуры – это транзисторы и в основном по МОП технологии, а процессы в МОП-транзисторе практически безынерционны.

Постоянная времени в миллисекундах выпрямителя определяется по формуле:

$$T_{ВЫПР} = R_H C_{\phi}, \quad (2.19)$$

где R_H – сопротивление нагрузки, Ом;

C_{ϕ} – емкость конденсатора фильтра, мкФ.

Постоянные времени двигателя и генератора будут зависеть от индуктивности обмоток машин и определяться по формуле [103]:

$$T_{ДВ} = \frac{L_{ДВ}}{R_{ДВ}}; \quad T_{ГЕН} = \frac{L_{ГЕН}}{R_{ГЕН}}. \quad (2.20)$$

В случае использования одинаковых электрических машин постоянные времени будут одинаковы.

Таким образом, электромагнитные постоянные времени будут равны:

$$T_{ЭДВ} = \frac{L_{ДВ}}{R_{ДВ}}; \quad T_{ЭГЕН} = R_H C_\phi \frac{L_{ГЕН}}{R_{ГЕН}}. \quad (2.21)$$

Характеристические уравнения для скоростей и моментов имеет вид [40, 48]:

$$T_M T_\omega p^2 + T_M p + 1 = 0. \quad (2.22)$$

Корни такого уравнения определяются классическим способом и выглядят в следующем виде:

$$p_{1,2} = \frac{1}{2T_\omega} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_\omega^2} - \frac{1}{T_\omega T_M}} = \frac{1}{T_M} \left(-\frac{m}{2} \pm \sqrt{\frac{m^2}{4} - m} \right), \quad (2.23)$$

где m – отношение постоянных времени, T_M/T_ω .

Могут наблюдаться различные варианты соотношения постоянных времени. Так, например, при $m > 4$ ($T_M > 4T_\omega$) корни являются вещественными:

$$p_{1,2} = \infty_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4}{m}}}{2T_\omega}. \quad (2.24)$$

Решение уравнения (2.23) будет иметь вид [48, 103]:

$$\omega = \omega_{уст} + Ae^{-\alpha_1 t} + Be^{-\alpha_2 t}. \quad (2.25)$$

Аналогично для уравнения (2.24) решение представляется в виде:

$$M = M_{уст} + Ce^{-\alpha_1 t} + De^{-\alpha_2 t}. \quad (2.28)$$

Коэффициенты A , B , C , D находятся из начальных условий. Например, для уравнения (2.25) начальные условия: $t=0$, $\omega=\omega_{нач}$. При этом в соответствии с уравнением движения:

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{НАЧ} = \frac{M_{НАЧ} - M_{УСТ}}{J_{СИСТ}}. \quad (2.29)$$

Тогда получим:

$$\begin{aligned} \omega_{НАЧ} &= \omega_{УСТ} + A + B, \\ \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{НАЧ} &= \frac{M_{НАЧ} - M_{УСТ}}{J_{СИСТ}} = -A\omega_1 + B\omega_2. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Из этих уравнений следует, что:

$$A = \frac{\omega_2(\omega_{НАЧ} - \omega_{УСТ}) + \frac{M_{НАЧ} - M_{УСТ}}{J_{СИСТ}}}{\omega_2 - \omega_1}, \quad (2.31)$$

$$B = \frac{\omega_1(\omega_{НАЧ} - \omega_{УСТ}) + \frac{M_{НАЧ} - M_{УСТ}}{J_{СИСТ}}}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (2.32)$$

На рисунке 2.8 показаны возможные изменения момента в переходном процессе по мере изменения показателя m .

Если $m < 4$ ($T_M < 4T_\vartheta$), то характеристическое уравнение имеет комплексно-сопряженные корни:

$$p_{1,2} = -\omega \pm j\omega_p; \quad \omega = \frac{1}{2T_\vartheta}; \quad \omega_p = \sqrt{\frac{1}{T_\vartheta T_M} - \frac{1}{4T_\vartheta^2}}. \quad (2.33)$$

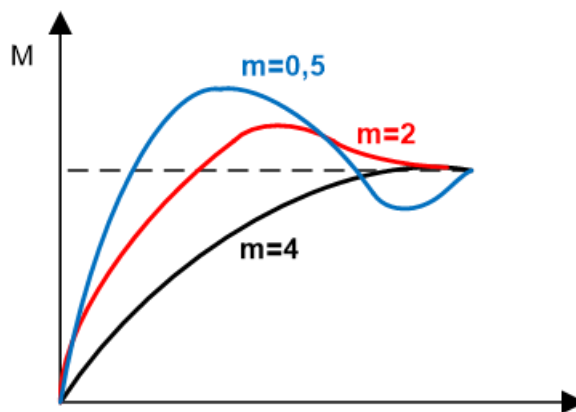


Рисунок 2.8 – Графики переходных процессов электромагнитного момента при вещественных корнях характеристического уравнения и разных m

Из полученных уравнений видно, что переходные процессы имеют колебательный вид с затуханием. Графики возможных переходных процессов представлены на рисунке 2.9.

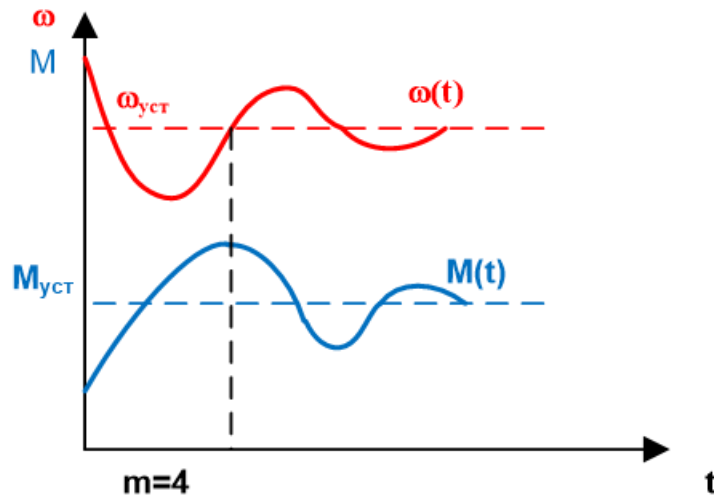


Рисунок 2.9 – Графики переходных процессов при комплексно-сопряженных корнях характеристического уравнения и разных m

Как видно из рисунка при вырастании нагрузки снижается угловая скорость, что приводит к росту тока и момента приводного двигателя. В тоже время из-за индуктивности рост тока и момента двигателя будет идти с отставанием от понижения скорости. При достижении момента равному установившегося значения скорость еще ниже установившейся, что приводит к дальнейшему росту момента. После этого момент еще пока выше установившегося значения, что приводит к дальнейшему росту скорости. Это происходит до того времени как скорость достигнет установившейся. Далее скорость продолжает расти, а момент уменьшаться. Возникают колебания скорости и момента, которые постепенно затухают. Если в эти моменты недопустимы такие снижения скорости, то такие амплитуды колебаний можно снизить увеличением модуля динамической жесткости механической характеристики [2]. Такого же эффекта можно достигнуть увеличением жесткости статической характеристики и уменьшением электромагнитной постоянной. Более подробный анализ переходных процессов нужно провести на фактиче-

ском оборудовании, так как это поможет избежать всплесков перенапряжений на заряжаемых батареях, что недопустимо.

2.4 Компьютерное моделирование переходных процессов в ВЭМП

Для уточнения характеристик переходных процессов необходимо провести анализ работы по данным конкретного оборудования. Процесс функционирования ВЭМП можно представить на примере механических характеристик, представленных на рисунке 2.8. Переходные процессы могут возникнуть в следующих ситуациях. При зарядке нескольких АБ установившийся статический режим соответствует точке 1 на графике рисунка 2.10. При возможном отключении одной или нескольких АБ система перейдет в точку 2, что будет сопровождать переходными процессами. Если не будет достаточно тока для заряда других АБ, то с помощью регулятора скорости РС (рисунок 2.3) будет переход электродвигателя на другую характеристику и система перейдет в точку 3. Естественно здесь также будет происходить переходный период. При подключении глубоко разряженных АБ генератор перейдет с переходным процессом в точку 4.

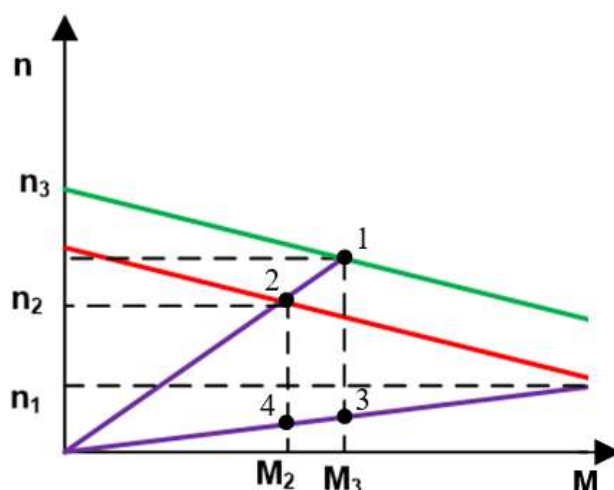


Рисунок 2.10 – График механических характеристик ВЭМП при изменении нагрузки

Для дальнейшего анализа необходимо выбрать электрические машины с их характеристиками и расчет нужные параметры для исследований. В ка-

честве электрических машин принимаем электродвигатели с постоянными магнитами для БПЛА типа ХМ6360ЕА-V3.

Первоначально определим соотношение постоянных времени для рассматриваемых электрических машин ВЭМП. Для этого вычислим момент инерции для данного электродвигателя по известной формуле для ротора используя справочные данные в сети Интернет [103]:

$$J = \frac{m_p R_p^2}{2} = \frac{0,3 \cdot 0,02^2}{2} = 0,00006 \text{ кг м}^2, \quad (2.34)$$

где m_p – масса ротора, 0,3 кг;

R_p – радиус вращения ротора, 0,02 м.

Для дальнейших расчетов принимаем момент инерции генератора такого же значения и момент инерции муфты приме в размере 0,2 J_p . Тогда момент инерции системы составит $J_{сист}=0,000132 \text{ кг м}^2$. Коэффициент жесткости механической характеристики двигателя определен на основе экспериментальных данных третьей главы, и он составил $\beta = 0,003 \text{ нм} \cdot \text{с}$. Коэффициент жесткости для генератора можно принять таким же. Тогда электромеханическая постоянная времени равна:

$$T_M = \frac{J_{сист}}{\gamma + \beta} = \frac{0,000132}{0,003 + 0,003} = 0,022 \text{ с}.$$

При малых нагрузках коэффициент жесткости генератора будет уменьшаться и может стать несоизмерим с коэффициентом двигателя. В таких случаях постоянная времени может увеличиться до 0,04 с. Необходимо определить электромагнитную постоянную данной машины. Согласно паспортным данным активное сопротивление якоря равно 9,8 мОм. Ток холостого хода при напряжении 10 В составил 2,6 А. При холостом ходе основная составляющая полного сопротивления это индуктивное сопротивление, которое будет равно 3,8 Ом. Такие данные по холостому ходу образуются при поступающей частоте тока на машину равную 200 Гц. Тогда в соответствии с формулой для реактивного сопротивления индукция машины составит 0,0031

Гн. На основании формул (2.22) электромагнитная постоянная времени для двигателя и генератора равны по 0,31 с.

Определим постоянную времени регулятора напряжения РН (рисунок 2.3) при условии отключенной АБ заряда или наличия ее с малой емкостью с последующим подключением. При подключении литиевой батареи 6С с током заряда 10 А, ее внутренне сопротивление (при допустимом разряде) составит 0,5 Ом (с учетом шести последовательных ячеек). Это при условии максимально заряженной батареи с напряжением 21,6 В, и минимальном напряжении 16,5 В. Тогда используя паспортные данные регулятора, формулу (2.21) и учитывая сопротивление нагрузки получим:

$$T_{ВЫПР} = R_H C_\phi = 0,5 \cdot 500 = 100 \text{ мс} = 0,25 \text{ с.} \quad (2.35)$$

При снижении тока потребления (в процессе заряда) постоянная РН будет увеличиваться.

Определим отношение постоянных времени установки m :

$$m = \frac{T_M}{T_\Sigma} = \frac{0,022}{0,31 + 0,31 + 0,12} = 0,03.$$

Таким образом $m < 4$ и очень сильно отличается от этого уровня. Следовательно, переходный процесс может быть длительным.

Если будет подключаться АБ меньшей емкости с соответственно меньшим током заряда, например, 1 А, то постоянная времени регулятора РН, выполняющего функцию выпрямителя, увеличится до 2,5 с.

Рассмотрим данную систему как объект управления. На рисунке 2.11 представлена структурная схема ВЭМП, соответствующая ранее полученным уравнениям (2.10) и (2.17). В схеме не представлены регуляторы РС и РН. Анализировать динамические процессы можно как по управляющему, так и по возмущаемому воздействиям. Дальнейшие исследования проведем в среде динамического моделирования SimInTech. На рисунке 2.12 приведена компьютерная модель ВЭМП для анализа динамических процессов в ПО SimInTech.

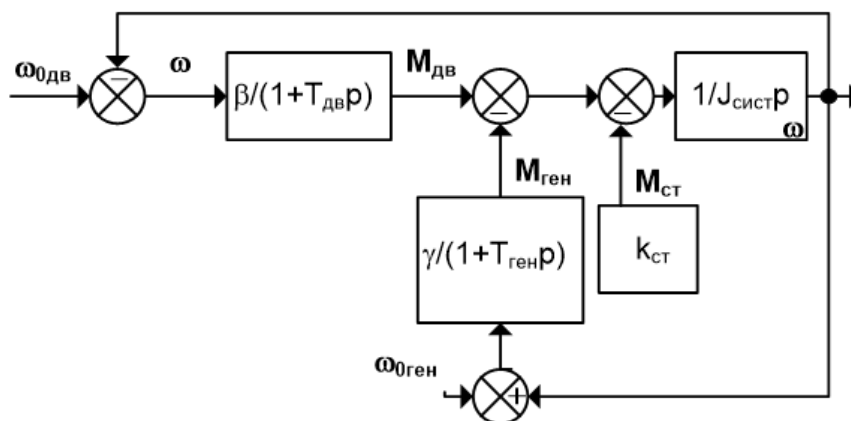


Рисунок 2.11 – Структурная схема электромашинного преобразователя

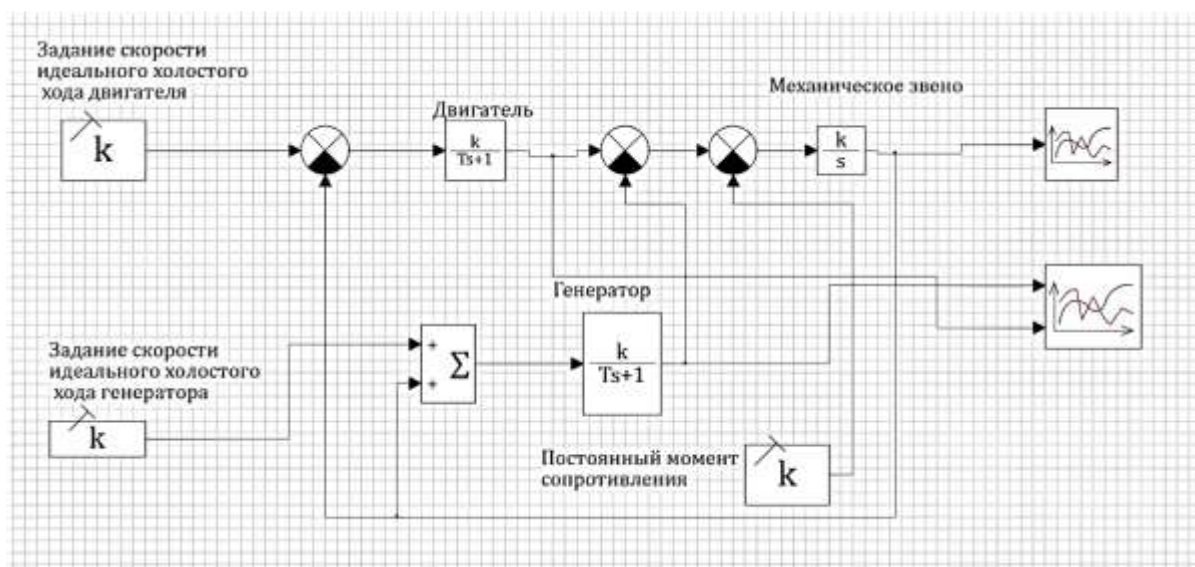


Рисунок 2.12 – Компьютерная модель ВЭМП в ПО SimInTech

В качестве исходных данных принимались следующие: момент инерции системы $J_{СИСТ}=0,000132$ кг м²; электромагнитная постоянная времени для двигателя и генератора равны по 0,31 с; статический момент сопротивления 0,2 н·м; коэффициент жесткости механической характеристики двигателя равен 0,003; коэффициент жесткости генератора изменялся от 0,0001 до 0,003 (имитировалась нагрузка на генератор), скорость идеального холостого хода генератора равна 0; скорость идеального холостого хода могла приниматься равной 523 с⁻¹ (5000 об/мин) и могла изменяться от 300 до 600 с⁻¹. Первоначально имитировался процесс запуска системы и последующее нагружение генератора.

На рисунке 2.13 представлен график изменения скорости электропривода от пуска с приложением нагрузки от холостого хода до двухэтапного приложения нагрузки. На рисунке 2.14 показаны изменения моментов двигателя и генератора.

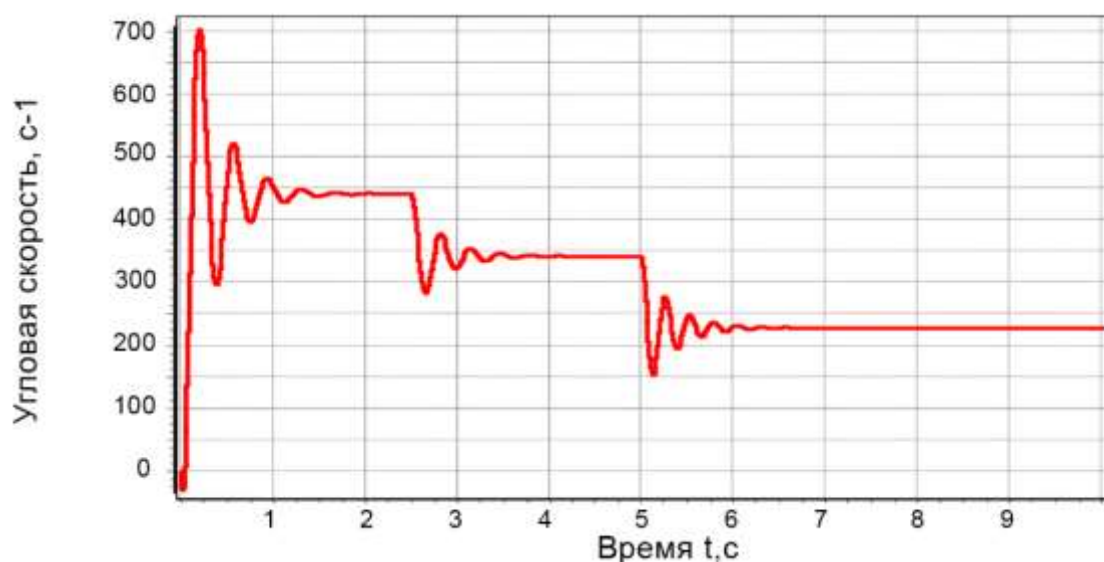


Рисунок 2.13 – График изменения скорости при приложении нагрузки на генератор преобразователя

В следующем этапе имитировалась работа системы при определенной нагрузке и изменялась скорость идеального холостого хода двигателя: 523 с^{-1} , 400 с^{-1} , 300 с^{-1} . Таким образом, производилось управляющее воздействие на систему. Графические результаты представлены на рисунках 2.15 и 2.16.

По рисункам 2.15 и 2.16 также видно, что регулирование также сопровождается переходными колебательными процессами, что может отрицательно сказываться на работе преобразователя.

Как видно из этих графиков все они имеют переходный колебательный процесс с затуханием, что подтверждает ранее приведенный вывод. Из рисунка 2.14 видно, что момент двигателя при пуске имеет гораздо больше амплитуду колебаний чем генератор.

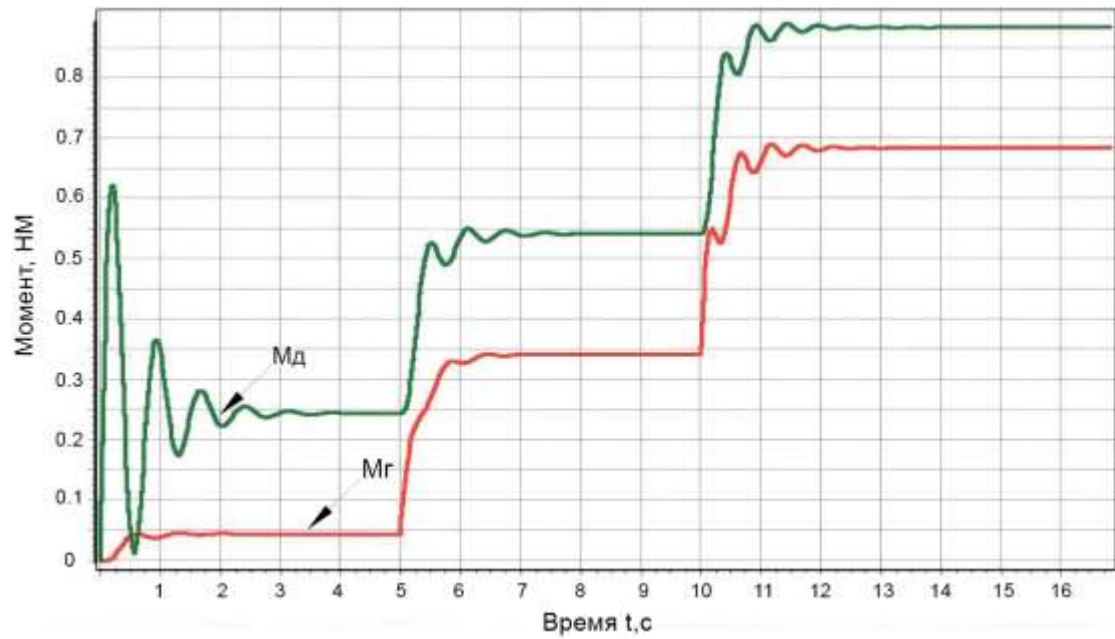


Рисунок 2.14 – График изменения моментов двигателя (M_d) и генератора (M_g) при приложении нагрузки на генератор преобразователя

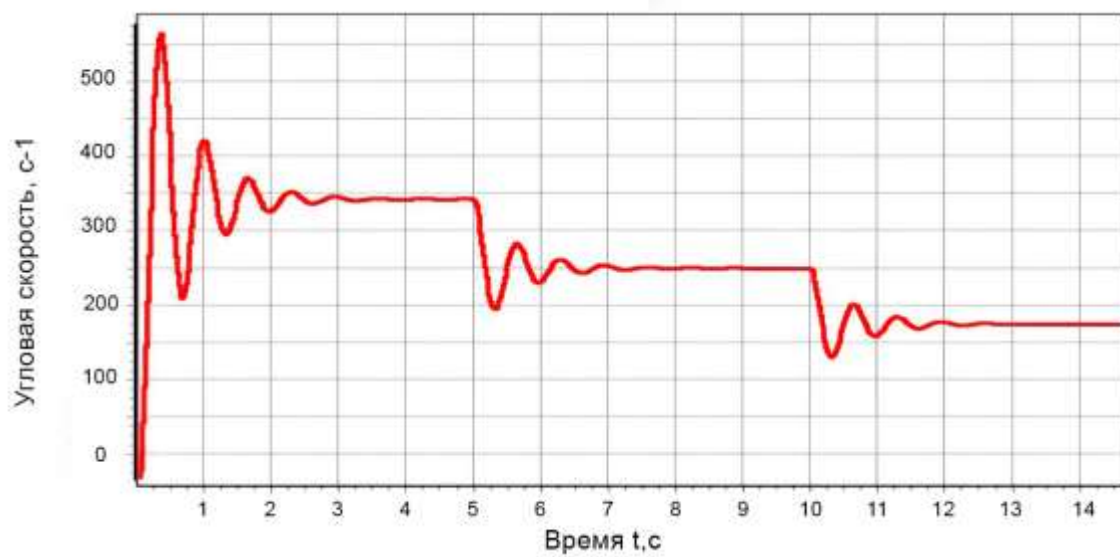


Рисунок 2.15 – График изменения скорости при изменении скорости идеального холостого хода двигателя

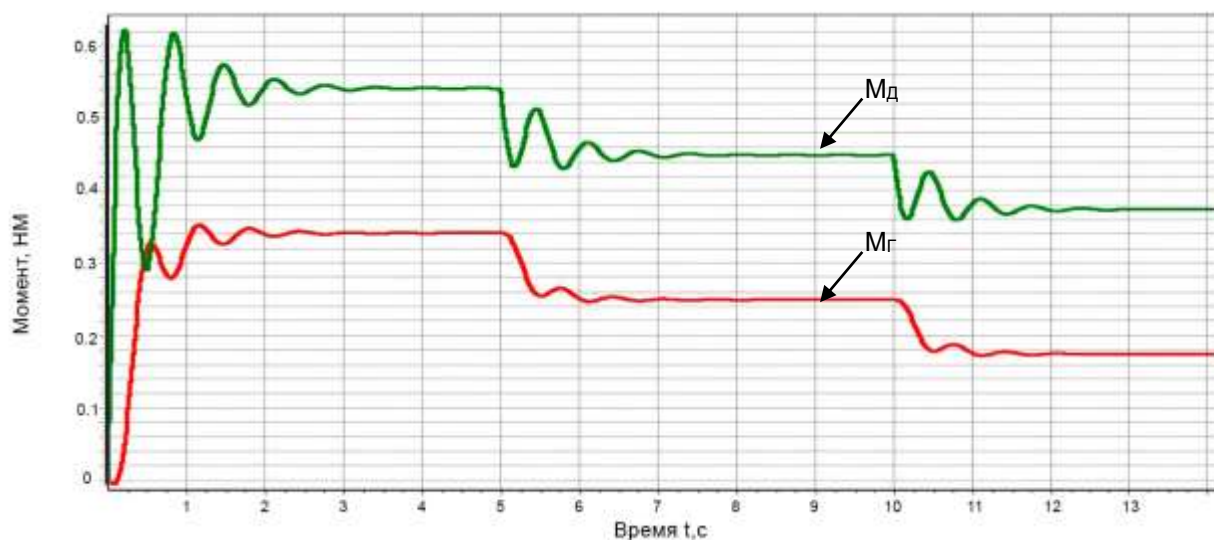


Рисунок 2.16 – График изменения моментов при изменении скорости идеального холостого хода двигателя

Для исследования работы ВЭМП на выпрямительную нагрузку разработана компьютерная модель (рисунок 2.17) на базе схемы, приведенной на рисунке 2.11. Первоначально подставим значение постоянной в соответствии с расчетом равную 0,25 с.

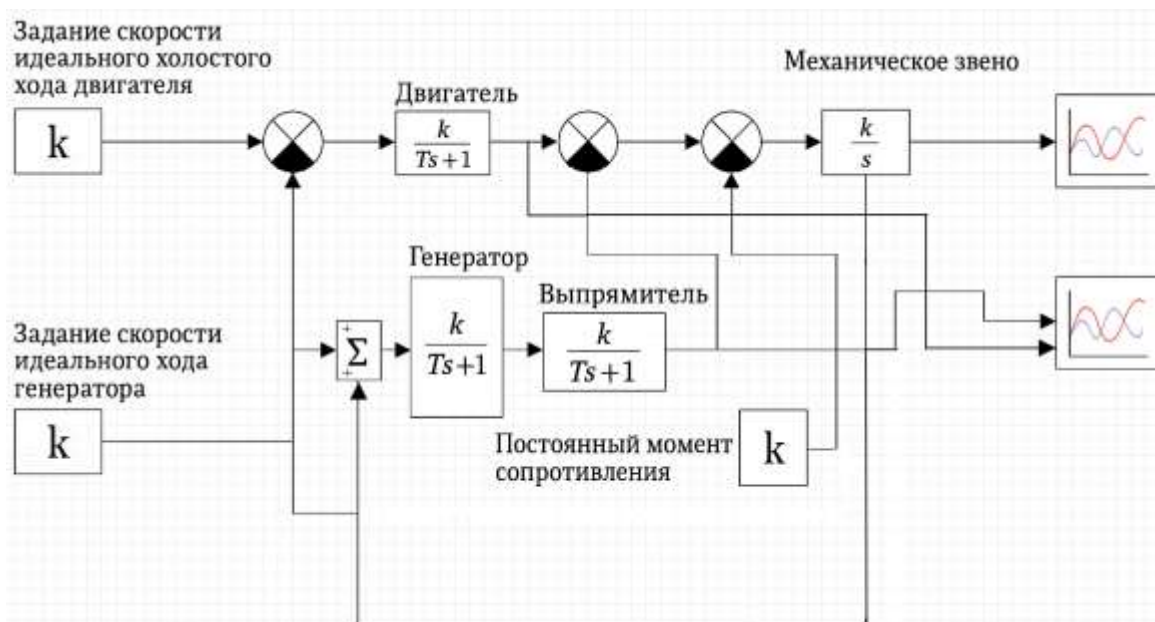


Рисунок 2.17 – Компьютерная модель ВЭМП с выпрямительной нагрузкой в ПО SimInTech

На рисунках 2.18 и 2.19 представлены графики переходных процессов, из которых видно, что на последнем этапе приложения нагрузки увеличилось время затухающих колебаний. В тоже время на втором этапе приложения

нагрузки сгладились амплитуды колебаний. Заменим постоянную времени на 1 и 2,5 с как приводилось в расчетах при меньших токах заряда. Соответствующие графики представлены на рисунках 2.20–2.23.

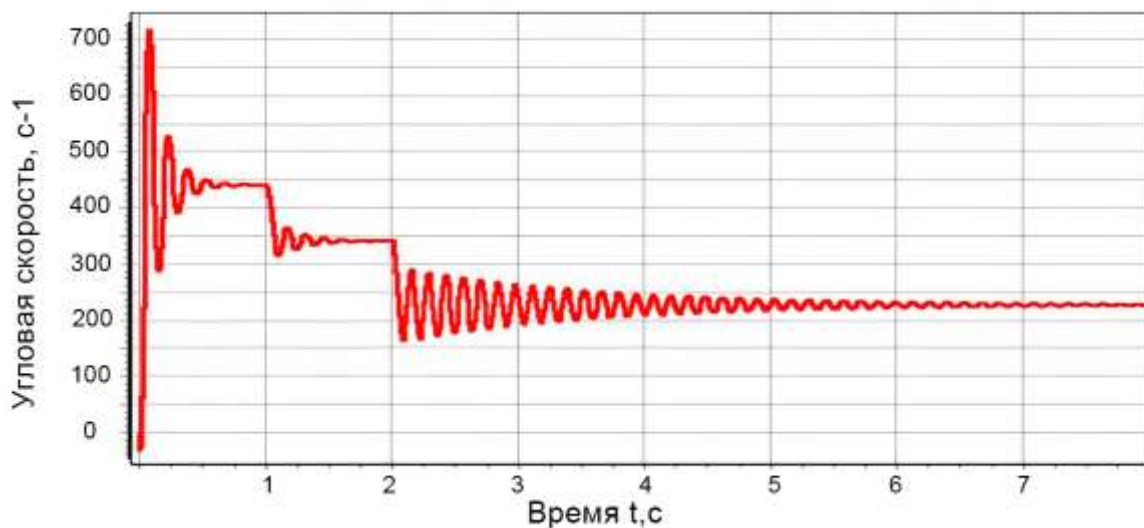


Рисунок 2.18 – График изменения скорости при приложении нагрузки на генератор преобразователя с выпрямителем

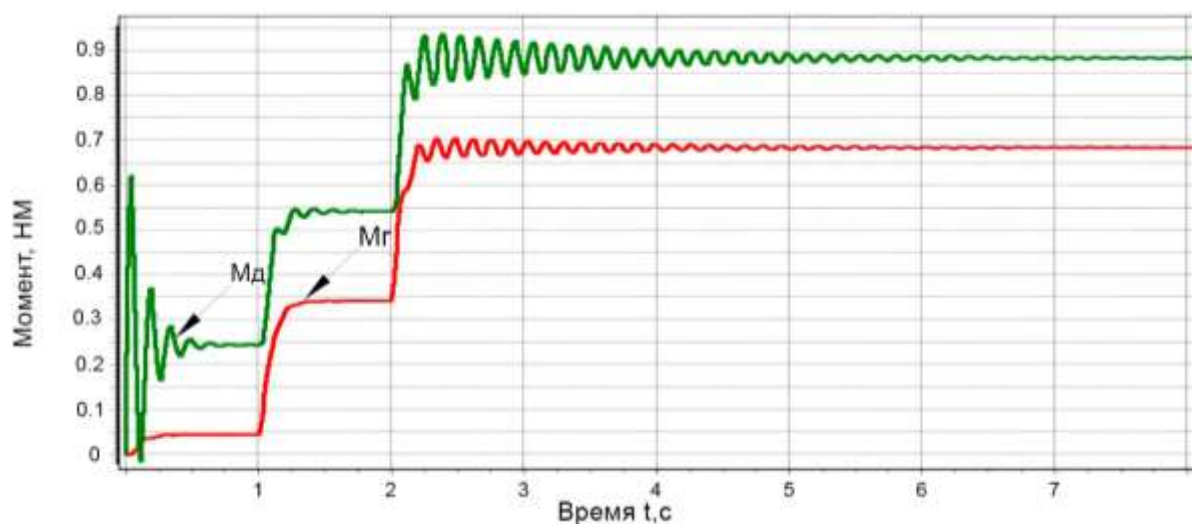


Рисунок 2.19 – График изменения моментов двигателя (M_d) и генератора (M_g) при приложении нагрузки на генератор преобразователя с выпрямителем

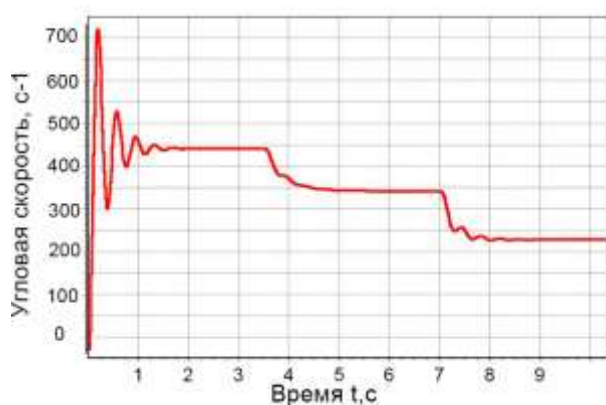


Рисунок 2.20 – График изменения скорости при приложении нагрузки с постоянной времени выпрямителя 1 с

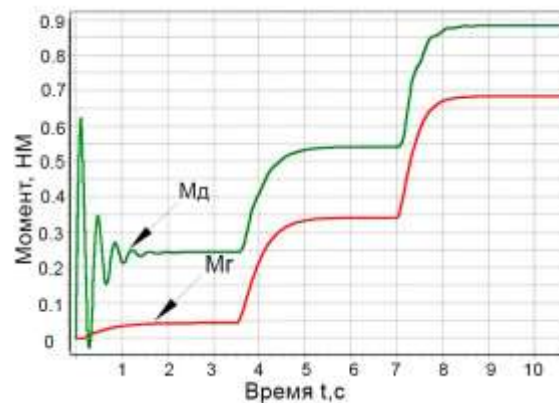


Рисунок 2.21 – График изменения моментов при приложении нагрузки с постоянной времени выпрямителя 1 с

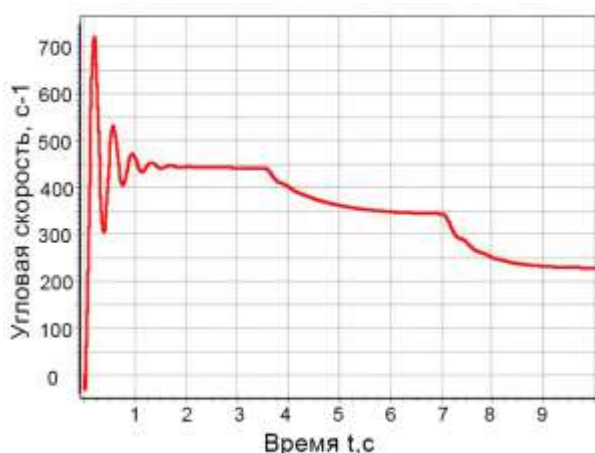


Рисунок 2.22 – График изменения скорости при приложении нагрузки с постоянной времени выпрямителя 2,5 с

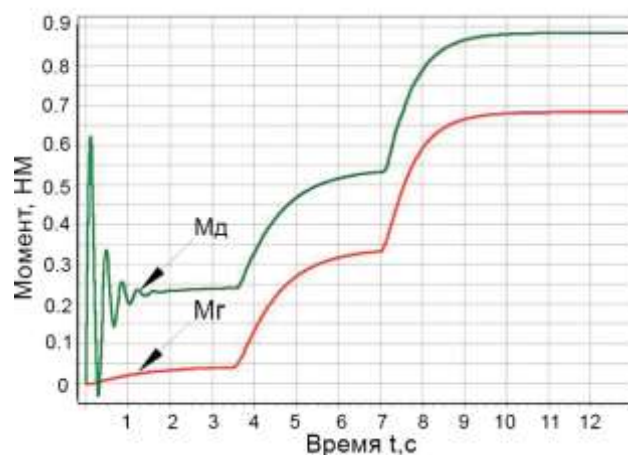


Рисунок 2.23 – График изменения моментов при приложении нагрузки с постоянной времени выпрямителя 2,5 с

В результате исследований по влиянию постоянной времени выпрямителя можно резюмировать: при значении этого показателя равному 1 с уже видно колебания уменьшаются (особенно на генераторе); при показателе равном 2,5 с характеристики еще лучше, кроме режима пуска двигателя. Следовательно, необходимо увеличить постоянную времени РН как минимум до 1 с, например, увеличив емкость конденсатора фильтра на выходе регулятора. Проанализируем работу системы при регулировании оборотов двигателя. Изменим ступенчато скорость идеального холостого хода, как и в предыдущем этапе при постоянной нагрузке. При этом введем два значения постоянной времени выпрямителя: 1 с и 2,5 с. Результаты представлены на рисунках 2.24–2.26.

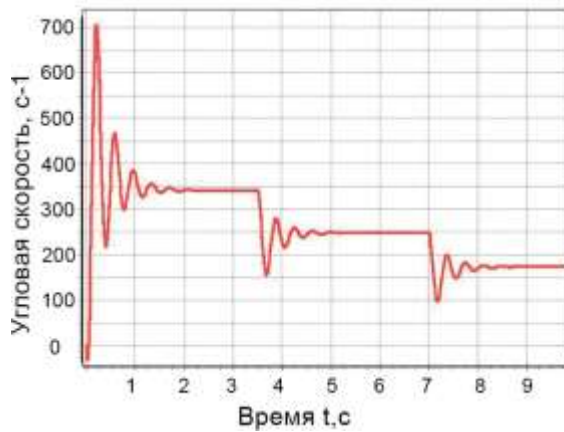


Рисунок 2.24 – График изменения скорости при изменении скорости идеального холостого хода двигателя с постоянной времени выпрямителя 1 с

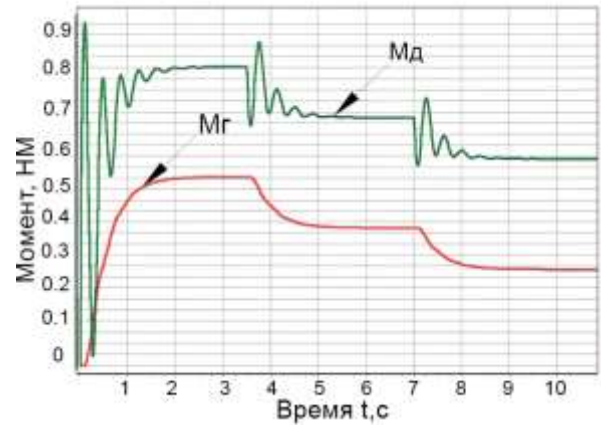


Рисунок 2.25 – График изменения моментов при изменении скорости идеального холостого хода двигателя с постоянной времени выпрямителя 1 с

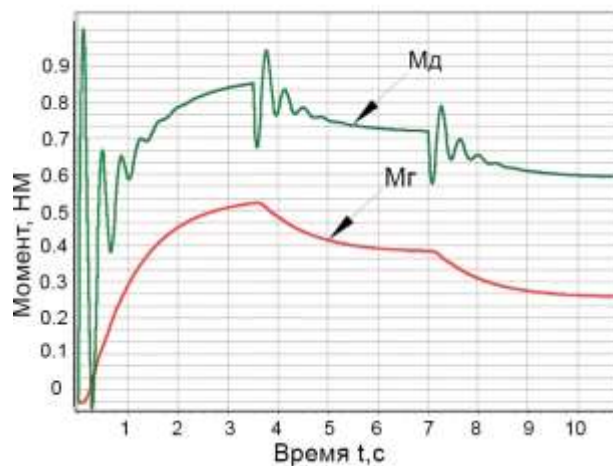


Рисунок 2.26 – График изменения моментов при изменении скорости идеального холостого хода двигателя с постоянной времени выпрямителя 2,5 с

Из полученных изображений рисунков 2.24–2.26 можно сделать следующие выводы:

- при регулировании скорости двигателя угловая скорость системы продолжает совершать колебания;
- генератор плавно изменяет свой момент, а момент двигателя продолжает совершать затухающие колебания;
- необходимо применять плавное регулирование скорости.

В компьютерную модель, приведенную на рисунке 2.17 введем блок плавного регулирования скорости (рисунок 2.27). Организуем процесс рабо-

ты преобразователя следующим образом: происходит запуск с облегченной нагрузкой в течение 10 с, затем в два этапа происходит плавное снижение скорости, после этого производится нагружение также в два этапа. Соответствующие графики представлены на рисунках 2.28, 2.29.

По полученным графикам рисунков 2.27–2.28 видно, что в этом случае колебания происходят только при пуске электропривода, а при регулировании наблюдается плавные изменения скорости и моментов, составляющих преобразователя.

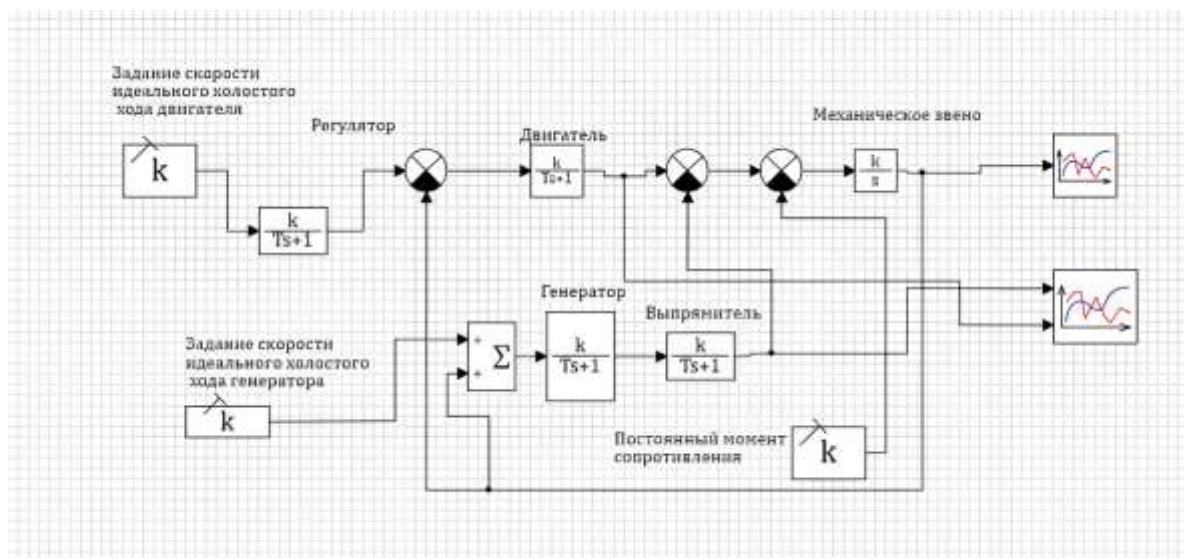


Рисунок 2.27 – Компьютерная модель ВЭМП с блоком плавного регулирования скорости двигателя в ПО SimInTech

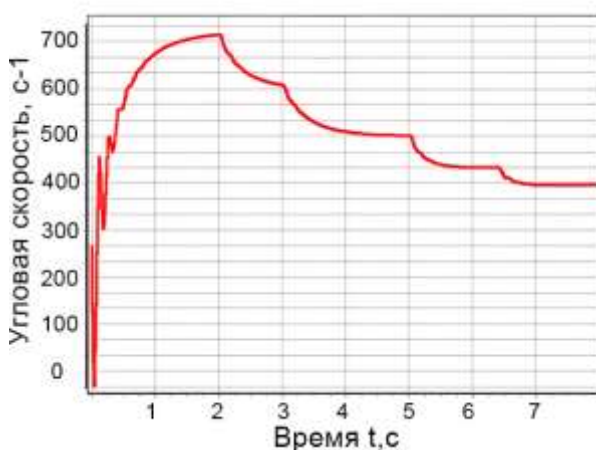


Рисунок 2.28 – График изменения скорости при изменении скорости идеального холостого хода двигателя с блоком плавного регулирования скорости двигателя

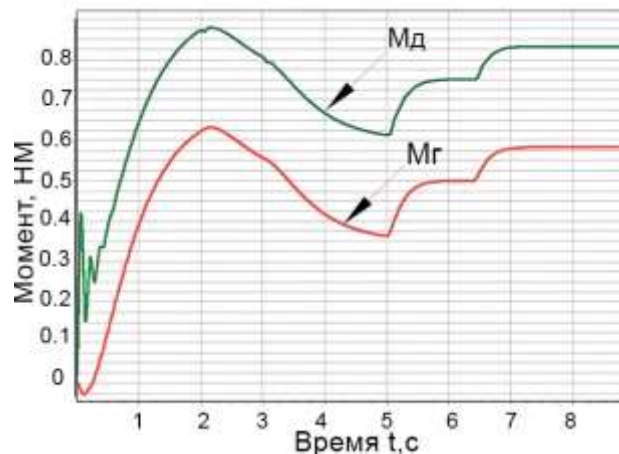


Рисунок 2.29 – График изменения моментов при изменении скорости идеального холостого хода двигателя с блоком плавного регулирования скорости двигателя

2.5 Выводы

Разработана структурная схема МЭС на ВЭМП и алгоритм работы системы автоматического управления, обеспечивающая бесперебойное электроснабжение потребителей электроэнергии, в том числе заряд АБ электроинструмента и БПЛА.

Предложена методика расчета рациональных параметров базовой аккумуляторной батареи и мощности источников мобильной энергосистемы.

Разработана функциональная схема для исследования работы ВЭМП в режиме заряда АБ.

Анализ уравнения движения электропривода ВЭМП показал, что в уравнениях механических характеристик двигателя и генератора нужно учесть инерционный характер электромагнитного момента. Установлено, что переходные процессы будут иметь колебательный вид с затуханием.

Для уточнения характеристик переходных процессов проводился анализ работы конкретного оборудования: в качестве электрических машин приняты электродвигатели с постоянными магнитами для БПЛА типа ХМ6360ЕА-V3 (мощностью до 3 кВт) с соответствующими регуляторами.

В результате расчетов установлено момент инерции системы $J_{сист}=0,000132$ кг/м²; электромагнитная постоянная времени для двигателя и генератора равны по 0,31 с; постоянная времени выпрямителя 0,25 с и при уменьшении нагрузки может увеличиваться до 2,5 с; статический момент сопротивления 0,2 н·м; коэффициент жесткости механической характеристики двигателя равен 0,003; коэффициент жесткости генератора может изменяться от 0,0001 до 0,003 (в зависимости от нагрузки на генератор), скорость идеального холостого хода генератора равна 0; скорость идеального холостого хода двигателя в номинальном режиме равна 523 с⁻¹ (5000 об/мин) и может изменяться от 300 до 600 с⁻¹.

С учетом полученных уравнений переходных процессов разработаны структурные схемы электромашиного преобразователя в ПО SimInTech.

Анализ динамических процессов при ступенчатых приложениях нагрузки и изменениях скорости идеального холостого хода двигателя подтвердили вывод о колебательном виде переходных процессов с затуханием.

В результате моделирования установлено, что увеличение постоянной времени выпрямителя с 0,25 с до 2,5 с при изменении нагрузки на генератор ВЭМП позволяет убрать колебательный вид переходного процесса на генераторе и частично на двигателе (кроме пускового режима). При изменении скорости идеального холостого хода двигателя колебательный процесс момента двигателя и скорости сохраняется, а у генератора происходят плавные изменения параметров.

Введение в структурную схему блока плавного регулирования угловой скорости электродвигателя с постоянной времени 3 с позволило ликвидировать колебательные процессы при регулировании и сократить время колебательного процесса при пуске, а также уменьшить его амплитуду колебаний.

3 МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОБИЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

3.1 Разработка стенда и методики проведения исследований ВЭМП

Для подтверждения теоретических исследований был изготовлен испытательный стенд ВЭМП, внешний вид которого представлен на рисунке 3.1.

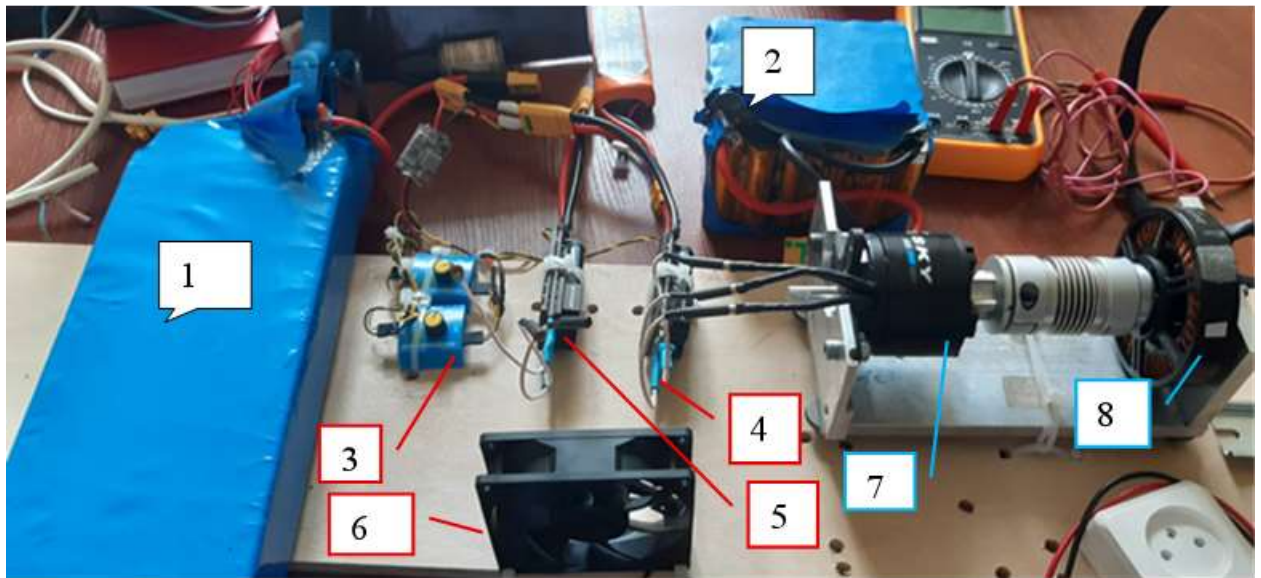


Рисунок 3.1 – Внешний вид стенда для испытаний установки

В качестве источника питания использовалась базовая АБ 1, подключенная к ВЭМП через регулятор скорости 5. С выхода регулятора скорости напряжение подается на двухагрегатный электромашинный преобразователь к электродвигателю 7, который соединен через муфту с генератором 8. С выхода генератора 8 через регулятор выпрямитель 4 энергия поступает на заряжающуюся АБ 2. Регулировка токов заряда производится через выносные потенциометры 3. Вентилятор 6 производит охлаждение регуляторов 4, 5. При длительной работе пара ВЭМП накрывается крышкой с охлаждающим вентилятором (нижнее изображение). Снятие характеристик установки производилось с использованием соответствующего измерительного оборудования.

Методика экспериментов заключалась в следующем. С помощью регулятора скорости устанавливались различные частоты вращения и подключая различный уровень нагрузки (с помощью реостатов) снимались необходимые электрические параметры.

В качестве приводного двигателя использовался электродвигатель XM6360EA-V3 (KV=380) для установки на БПЛА. Основные характеристики этого электродвигателя представлены в таблице 3.1. В качестве регуляторов и выпрямителя использовались преобразователи типа FLYcolor X-cross YV3160F. Источником питания была литиевая АБ 6С. Зарядка проводилась для различных АБ в соответствии с рекомендуемыми токами заряда. Измерение токов проводилось с помощью токовых клещей Актаком АТК-2200 и ИЕК СМ1С. Частота вращения контролировалась цифровым тахометром VICTOR DM6234P. Динамические процессы оценивались с помощью осциллографа-мультиметра SIGLENT АКИП-4125.

Таблица 3.1 – Основные характеристики электродвигателя XM6360EA-V3

Частота вращения, об/мин	Параметры			
	Сила тока, А	напряжение, В	мощность, Вт	КПД, %
4500	32,1	21,8	697	90,5
5000	44,2	21,6	953	90,8
5500	59,4	21,5	1267	90,9
6000	78	21,2	1645	90,9
6500	100,6	20,9	2094	90,8
7000	128,1	20,6	2620	90,6

Для создания нормального температурного режима использовались вентиляторы охлаждения (рисунок 3.2). Стенд смонтирован на одной панели ВЭМП с регуляторами и вентиляторами охлаждения.

3.2 Результаты экспериментальных исследований

Целью исследований было получить механические характеристики двигателя и генератора. В результате нагружения двигателя через генератор

были получены характеристики двигателя. На рисунке 3.3 представлены экспериментальные механические характеристики приводного электродвигателя с точкой холостого хода. В качестве генератора использовалась такая же электрическая машина, но с более низким показателем KV.

Из приведенных графиков рисунка 3.3 видно, что при малых скоростях вращения после приложения нагрузки резко снижается частота вращения данной пары машин. Вид данных характеристик совпадает с приводимыми данными в литературе для таких машин [40]. Резкое снижение частоты вращения также связано с изменением параметров подводимого напряжения от регулятора.

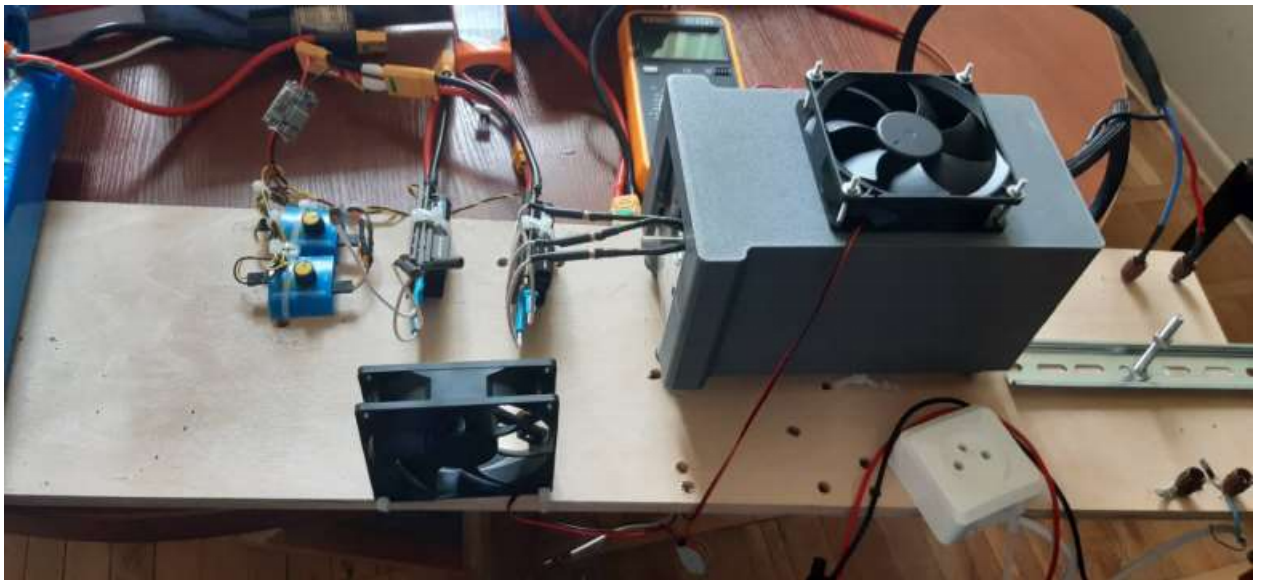


Рисунок 3.2 – Внешний вид установки с охлаждающими вентиляторами

На рисунке 3.4 представлены графики механических характеристик для приводного двигателя без точки холостого хода.

По рисунку 3.4 видно, что характеристики имеют линейный вид и обладают хорошей жесткостью, совпадающей с данными, приводимыми во 2-й главе.

На рисунке 3.5 показаны зависимости мощности двигателя от его тока. Здесь видно, что они имеют также линейный вид, что хорошо для поддержания параметров регулирования.

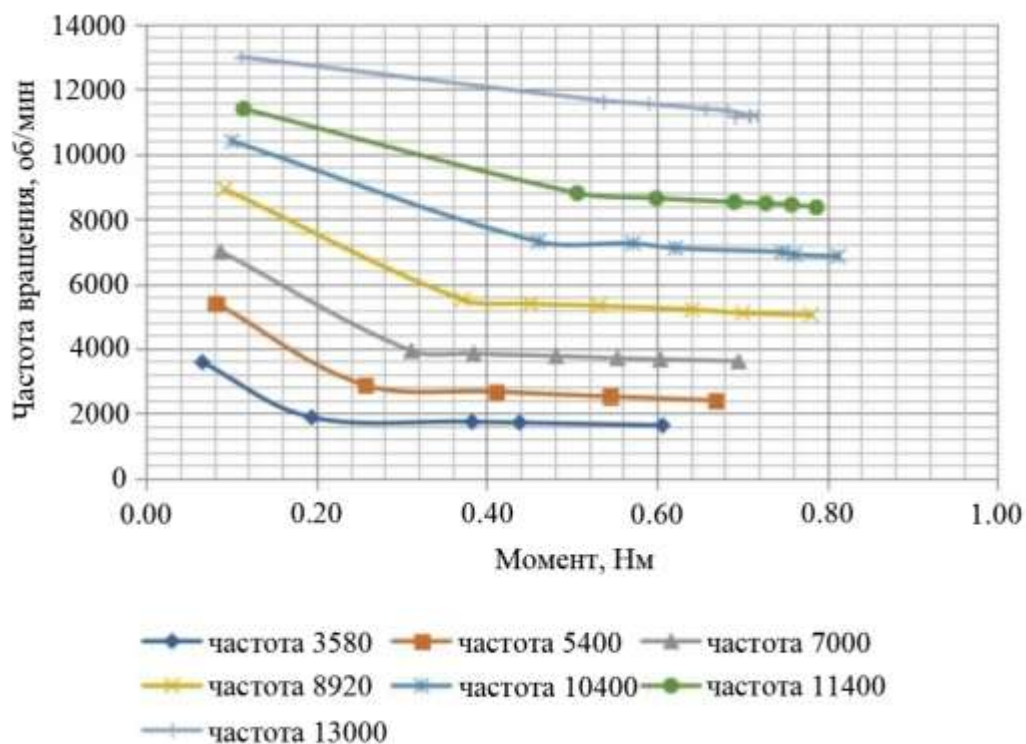


Рисунок 3.3 – Механические характеристики приводного двигателя с точкой холостого хода

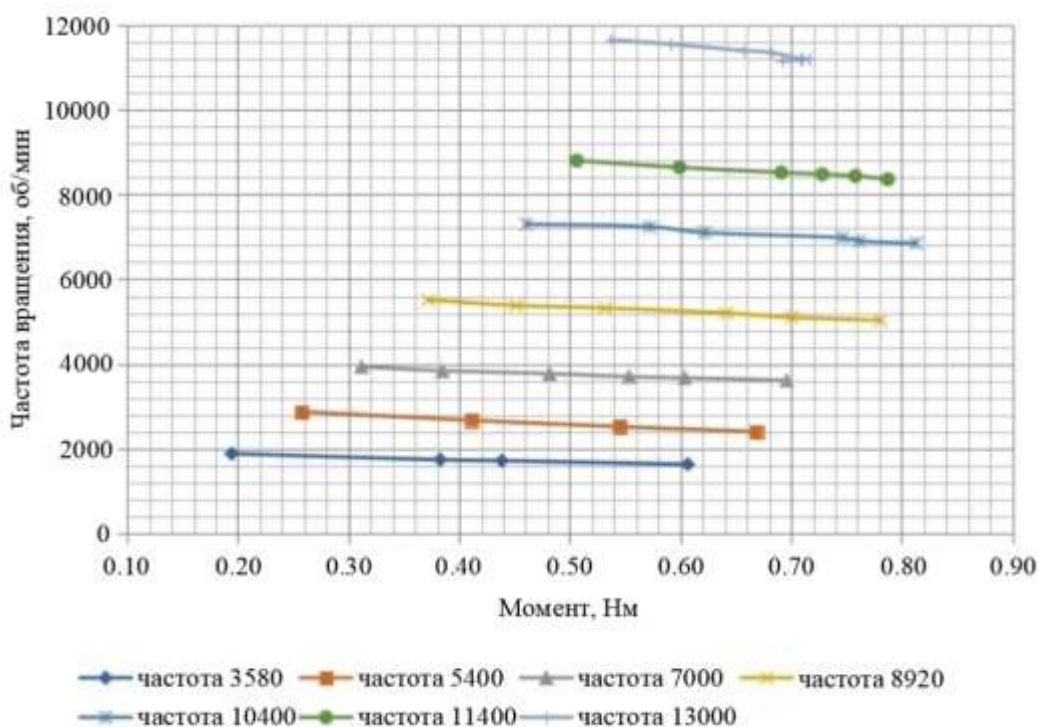


Рисунок 3.4 – Механические характеристики приводного двигателя без точки холостого хода

Для создания эффективного режима заряда батарей необходимо знать характеристики генератора в различных режимах управления. На рисунке 3.6

приведен график изменения переменного напряжения на генераторе и постоянного напряжения на выходе регулятора выпрямителя с отключенной нагрузкой. Как видно из приведенных характеристик изменение выходного напряжения от частоты вращения генератора имеет практически линейный вид. Также можно наблюдать максимальный уровень постоянного тока составляет 65 В, что будет достаточно для заряда батарей с уровнем напряжения 48 В.

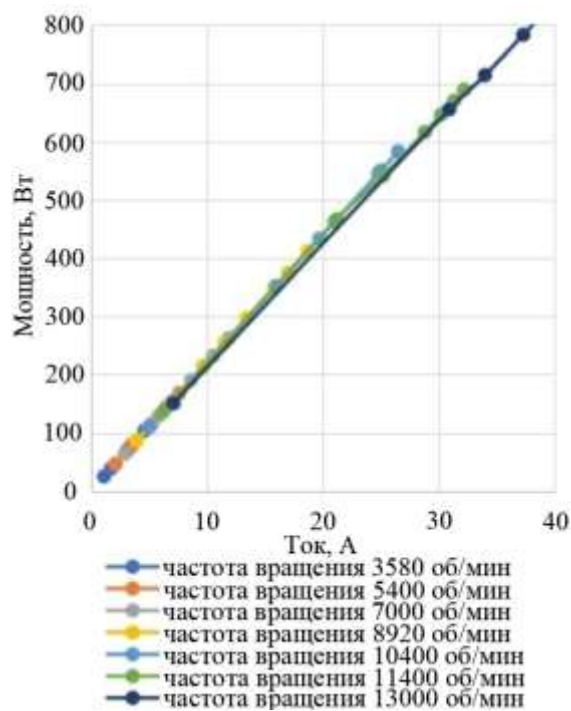


Рисунок 3.5 – Зависимости мощности двигателя от его тока

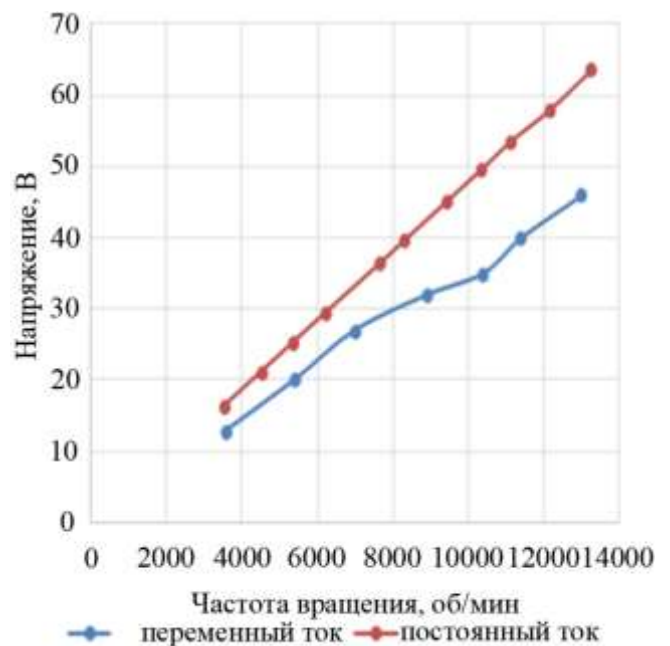


Рисунок 3.6 – Зависимость выходного напряжения на генераторе и регуляторе от частоты вращения

На рисунке 3.7 изображены графики изменения выходного напряжения генератора при изменении нагрузки. Здесь также можно наблюдать изменение жесткости характеристик при регулировании частоты вращения электродвигателя.

На рисунках 3.8 представлены графики изменения выходной мощности генератора. Из приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, что двигатель имеет запас по мощности, а у генератора наблюдается перегрузка

при повышенных токах. Особенно ярко выражается спад выходной мощности генератора при больших скоростях.

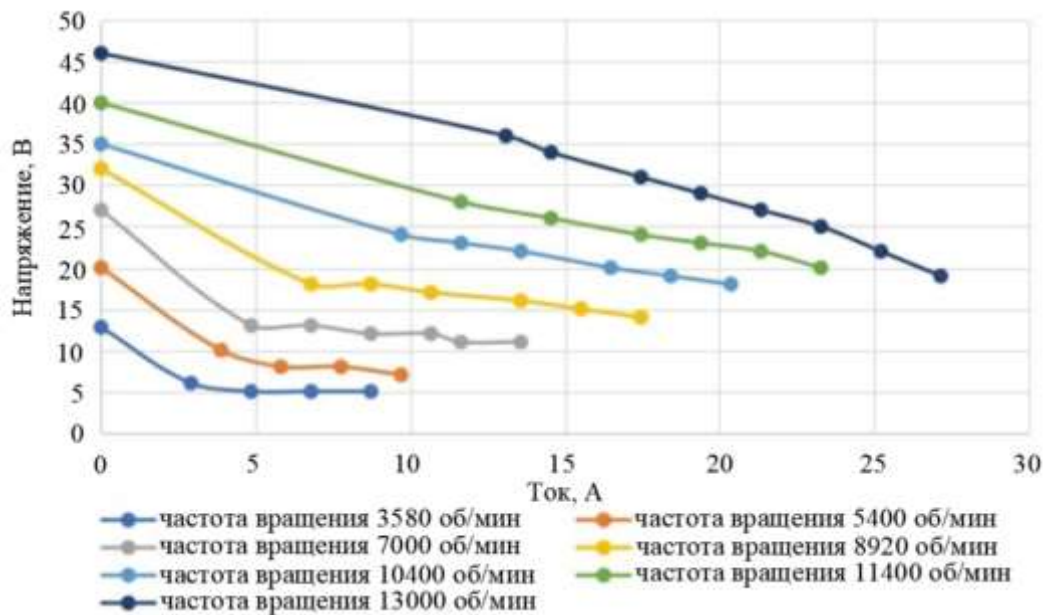


Рисунок 3.7 – Графики изменения выходного напряжения генератора при изменении тока нагрузки

На рисунках 3.8 представлены графики изменения выходной мощности генератора. Из приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, что двигатель имеет запас по мощности, а у генератора наблюдается перегрузка при повышенных токах. Особенно ярко выражается спад выходной мощности генератора при больших скоростях.

На рисунке 3.9 изображены графики КПД установки при различных скоростях. По приведенным графикам видно, что есть оптимальные режимы с точки зрения энергоэффективности.

Следующим этапом экспериментальных исследований стало снятие временных характеристик работы установки. Для этого был дополнительно подключен осциллограф для фиксации переходных процессов (рисунок 3.10).

В результате записи тока электродвигателя при пуске и последующем снижении скорости представлены на рисунках 3.11 и 3.12. Как видно из приведенных графиков резкое повышение (при пуске) или снижение скорости

приводит к переходному процессу с бросками тока, что совпадает с графиками моделей, представленных на рисунках 2.20, 2.22.



Рисунок 3.10 – Внешний вид установки с подключенным осциллографом

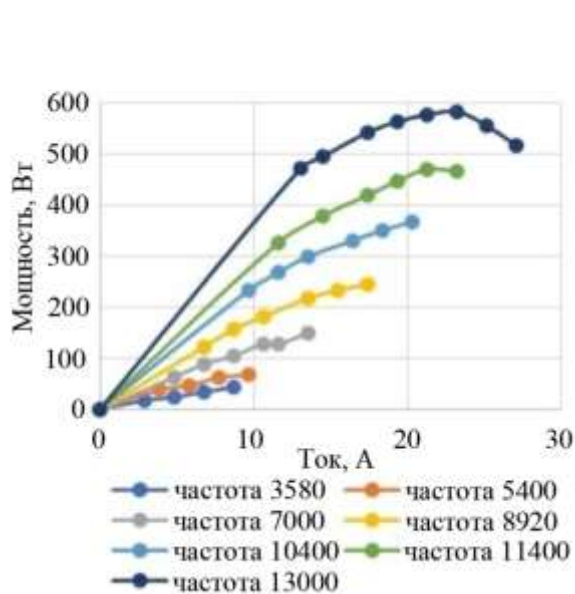


Рисунок 3.8 – Зависимости выходной мощности генератора от тока нагрузки

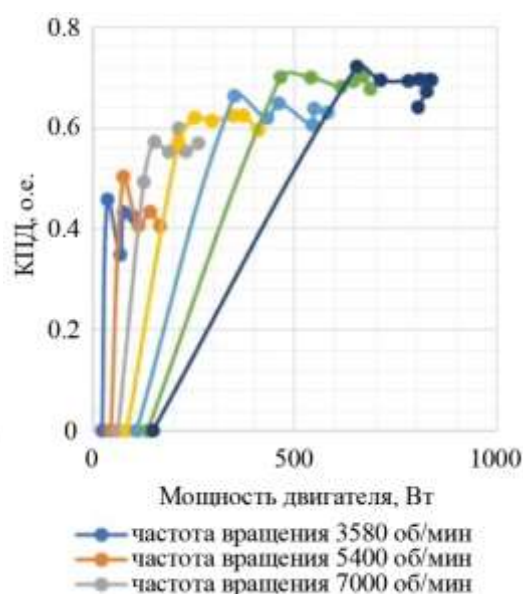


Рисунок 3.9 – Графики изменения КПД установки при изменении нагрузки при разных частотах вращения

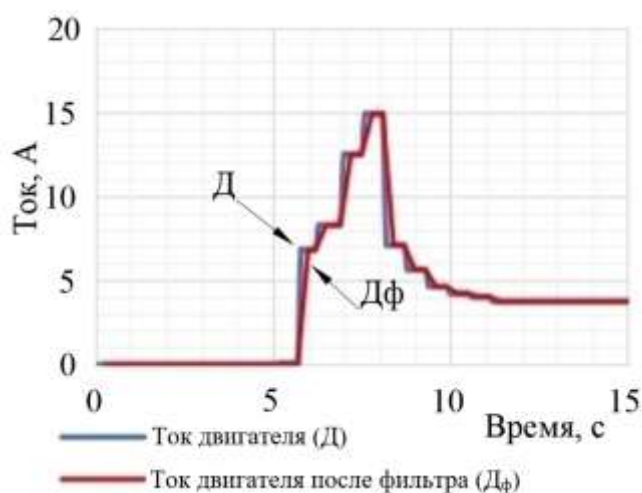


Рисунок 3.11 – Зависимости тока электродвигателя от времени при пуске и снижении скорости

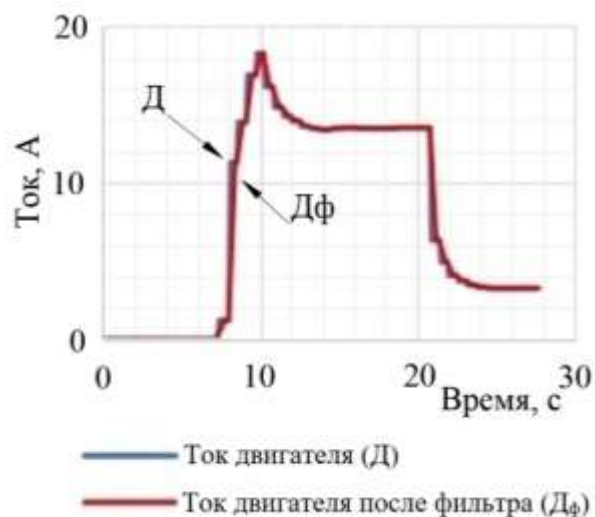


Рисунок 3.12 – Временная зависимость тока электродвигателя при пуске и двухступенчатом снижении скорости

В случае работы электродвигателя на малой скорости, а потом ее повышения в два этапа, график представлен на рисунке 3.13. В этом случае регулятор плавно изменяет скорость идеального холостого хода, что приводит только к небольшому колебанию при таких переходах. Если резко увеличить нагрузку, возникает кратковременный переходный процесс (рисунок 3.14).

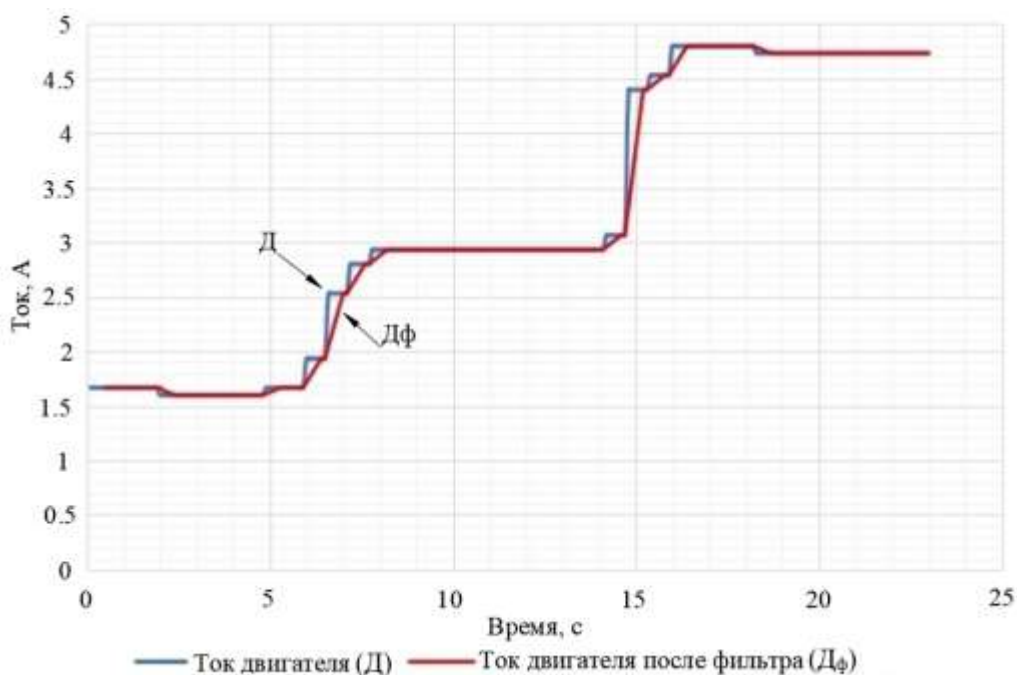


Рисунок 3.13 – Временная зависимость тока электродвигателя при ступенчатом повышении скорости

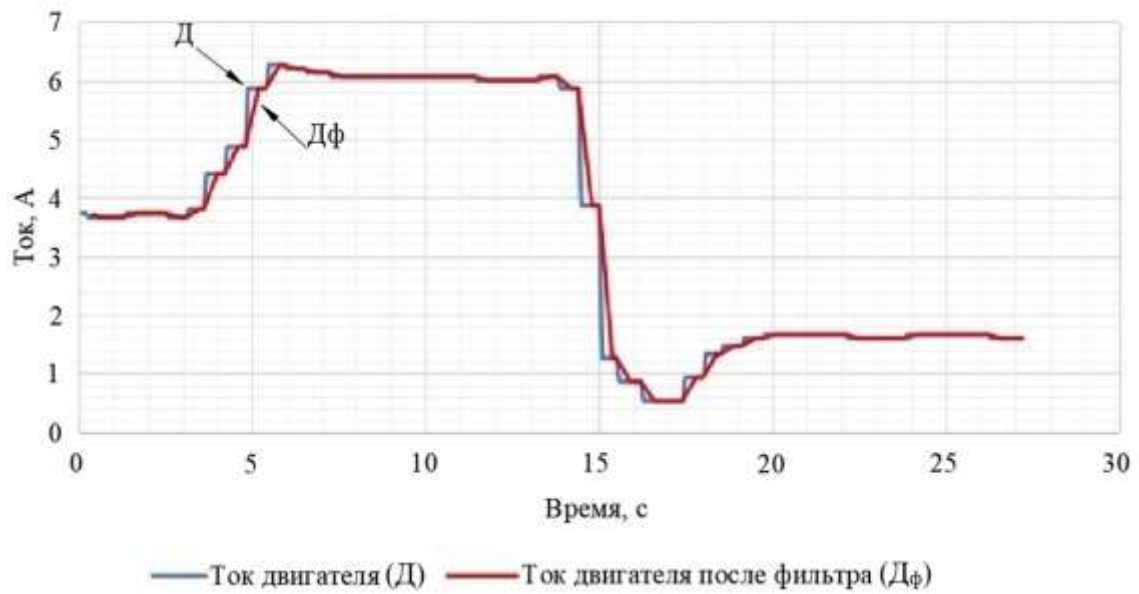


Рисунок 3.14 – Временная зависимость тока электродвигателя при ступенчатом повышении скорости

Фиксирование переходных процессов в генераторе показало плавное изменение выходного тока без колебательных возмущений (рисунок 3.15 и рисунок 3.16).

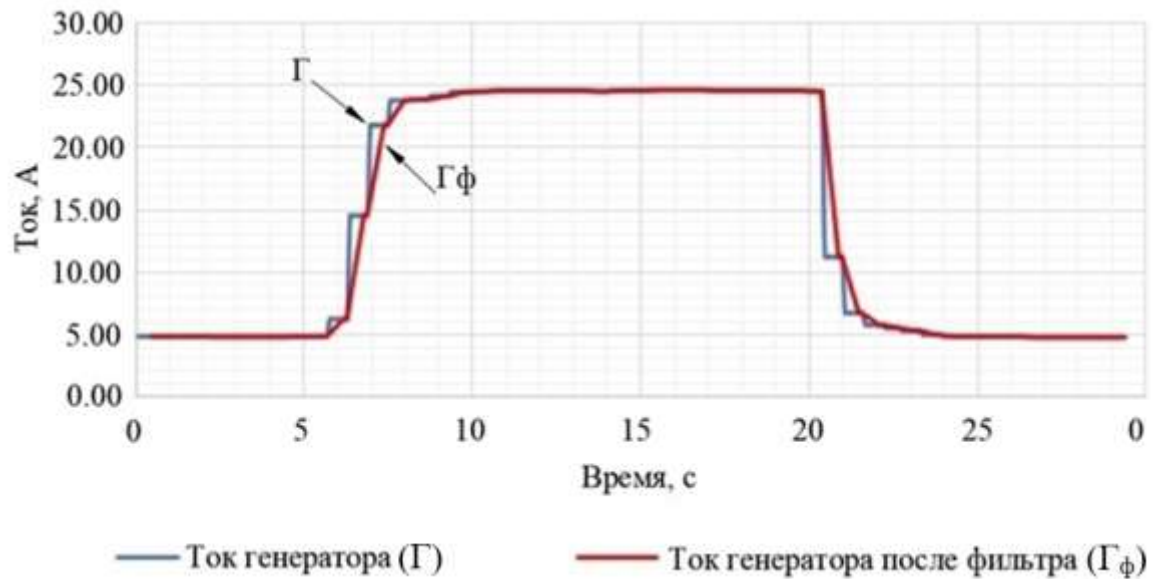


Рисунок 3.15 – Временная зависимость тока генератора при работе на определенной скорости и приложении / снятии нагрузки

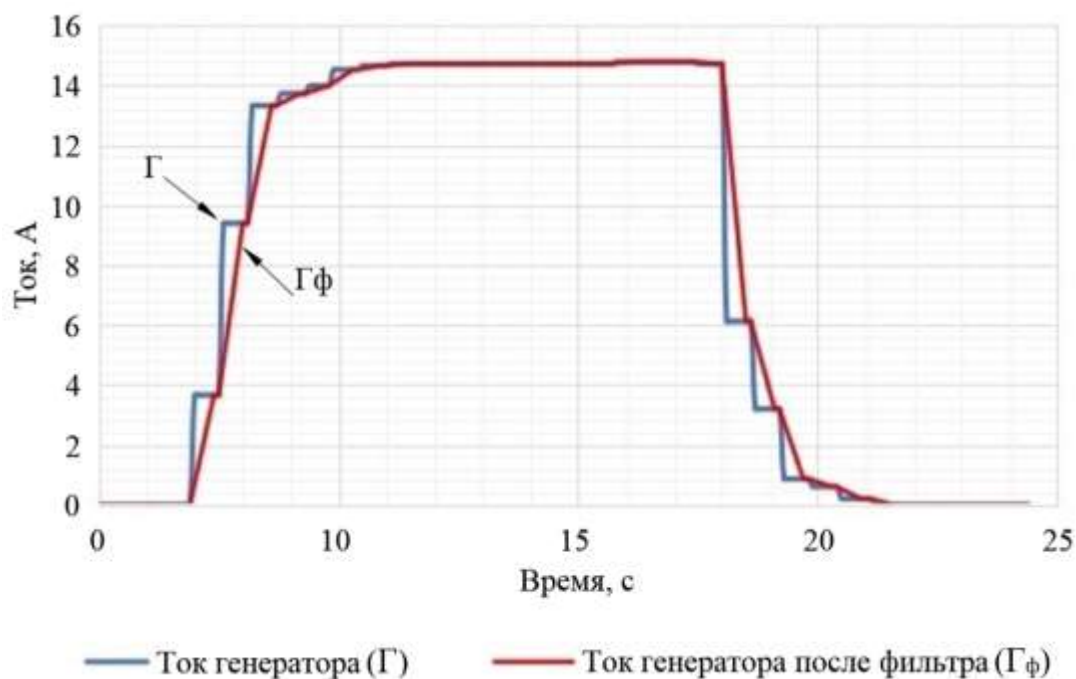


Рисунок 3.16 – Временная зависимость тока генератора при пуске, приложении и снятии нагрузки

Анализ постоянных времени двигателя и генератора подтверждается экспериментами: переходный процесс двигателя происходит за 3 с; переходные процессы генератора происходят за 5 с (с учетом постоянной времени блока заряда батарей).

3.3 Техничко-экономическая оценка мобильной энергосистемы

3.3.1 Оценка экономических показателей зарядных устройств

Целесообразно провести сравнение технико-экономических показателей известных и разработанного структурно-схемного решения автономных электростанций, выполняющих функции зарядных устройств, для заряда АБ электроинструментов и БПЛА в полевых условиях. Принимаем для всех ЗУ мощность источника электроэнергии равную 1 кВт (БЭС и СБ), а емкость базовой АБ – 60 А·ч.

Вариант 1. Классическая схема ЗУ, содержит бензоэлектростанцию (БЭС) и три электронных одноканальных зарядных устройств каждый с номинальным значением выходного напряжения 12, 24 или 36 В (рисунок 3.17, а).

Вариант 2. Схема содержит солнечные батареи (СБ) – источник электроэнергии, базовую АБ и три гибридных инвертора (ГИ), выполняющих функцию зарядного устройства, также на номинальные значения напряжения 12, 24, 36 В (рисунок 3.17, б).

Вариант 3. Разработанная схема ЗУ содержит солнечную батарею (СБ), базовую АБ и ВЭМП с регуляторами скорости и напряжения, (рисунок 3.17, в). Регулятор напряжения изменяет величину номинального напряжения от 0 до 60 В.

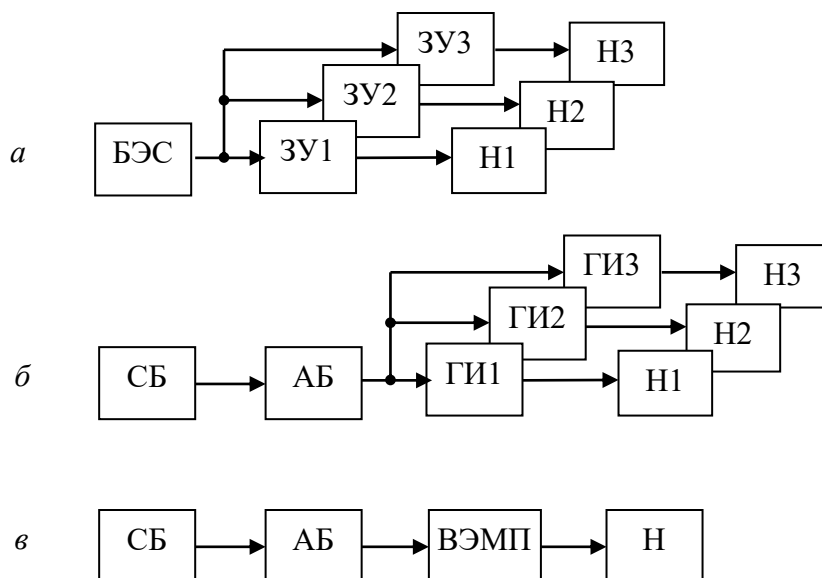


Рисунок 3.17 – Структурные схемы зарядных устройств:

Н – нагрузка (АБ электроинструмента и БПЛА)

Важным показателем топливных генераторов являются эксплуатационные затраты, которые включают затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования, а также затраты на топливо.

Эксплуатационные затраты на БЭС определяются по формуле:

$$\mathcal{E}_{БГ} = \mathcal{Z}_P C_{БГ} + t_{РАБ} C_B P_B, \quad (3.1)$$

где $\mathcal{Z}_P$ – затраты на текущий ремонт бензогенератора в относительных единицах равны 0,02 – 0,03 (2–3 % от стоимости электростанции),

$C_{БГ}$ – стоимость бензогенератора, руб;

$t_{РАБ}$ – время работы бензогенератора в сезон эксплуатации станции, ч;

C_B – стоимость бензина с учетом доставки, руб/л;

P_B – расход бензина, л/ч.

Если принять, что в течение суток БЭС осуществляющая заряд базовой АБ электроинструмента работает 5-6 ч., то в сезон (май-сентябрь) это составит около 750 ч., тогда эксплуатационные затраты на станцию составят:

$$\mathcal{E}_{БГ} = 0,025 \cdot 25000 + 750 \cdot 60 \cdot 0,3 = 14125 \text{ руб.}$$

Здесь важно учитывать, что ресурс БЭС до капитального ремонта составляет около 1200 ч. Срок службы, в зависимости от модели, находится в пределах 3000–5000 ч. Таким образом, капитальный ремонт рекомендуется проводить примерно каждые два года.

В таблице 3.2 приведены технико-экономические показатели трех вариантов электростанций ЗУ при их работе в течение одного сезона (с мая по сентябрь), где КЗ – капитальные затраты, ЭЗ – эксплуатационные затраты, ОЗ – общие затраты.

Таблица 3.2 – Технико-экономические показатели электростанций зарядных устройств

Электро-станции	Элементы	Кол. шт	Масса, кг	Общая масса, кг	КЗ, тыс. руб	Общие КЗ, тыс.руб	ЭЗ, тыс. руб	ОЗ, тыс. руб
Вариант 1	Бензоагрегат ЗУ Комета-С	1	20	20	25	25	14,1	39,1
		3	3,5	10,5	49	147		147
	Итого	4		30,5		172	14,1	186,1
Вариант 2	СБ	2	26	52	11,3	22,6		22,6
	Базовая АБ	1	6,3	6,3	15,2	30,4		30,4
	ГИ	3	4,4	13,2	24,8	74,4		74,4
	Итого	6		71,5				127,4
Вариант 3	СБ	2	26	52	11,3	22,6		22,6
	Базовая АБ	1	6,3	6,3	15,2	30,4		30,4
	ВЭМП	1	2,5	2,5	26,5	26,5		26,5
	Итого	4		60,8				79,5

Как видно из таблицы 3.2 зарядное устройство на базе ВЭМП уступает только по массе ЗУ на бензоагрегате, при этом, если в качестве источника

питания ВЭМП применить БЭС, то такая станция будет иметь общую массу 28,8 кг. Общие затраты на электростанцию на базе ВЭМП в 2,3 раза меньше чем на ЗУ на бензоагрегате и в 1,6 раз меньше ЗУ на гибридных инверторах.

Однако с учетом длительного периода эксплуатации автономных электростанций, преимущества электростанции на ВЭМП очевидны. Здесь, важным показателем является то, что ЗУ на ВЭМП могут осуществлять заряд АБ с разными номинальными значениями в соответствии с характеристиками, приведенными в таблицах 1.1 и 1.2.

3.3.2 Оценка экономических показателей мобильной энергосистемы

Для обеспечения фермерских хозяйств МЭС малой мощности (суточное потребление энергии не превышает 30 кВт·ч) в Краснодарском крае необходимо организовать серийное производство адаптированных к конкретным сельскохозяйственным потребителям установок. Целесообразно расчет технико-экономических показателей провести с расчета на 100 хозяйств, что будет ориентиром для дальнейших разработок МЭС для АПК Краснодарского края [11, 42].

На первом этапе необходимо определить затраты на НИОКР. Общие затраты на проведение НИОКР (общий фонд зарплаты с начислениями) определяется по формуле:

$$З_{НИОКР} = З_О + З_Д + З_Э + Н + З_{СК} \cdot K_{ТР}, \quad (3.2)$$

где $З_О$ – основная заработная плата;

$З_Д$ – дополнительная заработная плата;

$З_Э$ – затраты на энергоресурсы;

$Н$ – накладные расходы;

$З_{СК}$ – суммарные затраты на функциональные элементы установки и комплектующие;

$K_{ТР} = 1,05$ – коэффициент транспортных заготовительных расходов.

В общем случае затраты на разработку МЭС складываются из расходов по следующим статьям: затраты на комплектующие; заработная плата разработчиков; затраты на энергоносители. Сведения расходов на заработную плату разработчиков приведены в таблице 3.3.

Данные по зарплате брались по среднему уровню по соответствующей отрасли в Краснодарском крае за 2024 год на примере предприятия ООО «Солнечный центр». Принимаем, что надбавка к зарплате будет отсутствовать, то есть $Z_D = 0$.

Основная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_O = 44\,920 + 44\,920 \cdot K_H = 44\,920 + 44\,920 \cdot 0,31 = 58\,845 \text{ руб.}, \quad (3.3)$$

где $K_H = 0,31$ – коэффициент начислений на заработную плату.

Принимаем накладные расходы в размере 30 % от общего фонда заработной платы:

$$H = 58\,845 \cdot 0,3 = 17\,653 \text{ руб.} \quad (3.4)$$

Затраты на энергоносители по данным ООО «Солнечный центр» не превышают $Z_E = 1000 \text{ руб.}$

В таблице 3.4 приведены сведения о стоимости основных функциональных элементов МЭС с выработкой энергии в сутки мощностью 3 кВт·ч. В качестве резервных источников применяются БЭС мощностью 2 кВт и аккумуляторные батареи общей емкостью 100 А·ч.

Таким образом, суммарные затраты на функциональные элементы МЭС и комплектующие $Z_{СК} = 146500 \text{ руб.}$

Общие затраты на проведение НИОКР в соответствии с (3.2) составляют:

$$Z_{НИОКР} = 58\,845 + 1000 + 17\,653 + 146500 \cdot 1,05 = 231323 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата производственных рабочих начисляется с учетом выполнения сборочно-монтажных и регулировочных работ и составляет примерно 10 000 руб. Таким образом полная себестоимость производ-

ства одной МЭС с резервными источниками электроэнергии составляет $C_{\Pi}=241323$ руб.

Таблица 3.3 – Заработная плата разработчиков МЭС

№ п/п	Этапы разработки	Исполнители	Почасовая ставка, руб.	Количество исполнителей, шт.	Трудоемкость, ч.	Затраты, руб.
1	Получение ТЗ и разработка ТУ на схемное решение станции	Ведущий инженер	500	1	10	5000
2	Разработка схемы станции	Инженер	450	1	3	1350
3	Приобретение комплектующих и изготовление (сборка) образца	Инженер Техник	450 350	1 1	24 24	10800 8400
4	Испытания и наладка станции	Инженер Техник	450 350	1 1	12 12	5400 4200
5	Оформление протоколов испытаний	Инженер	450	1	2	900
6	Разработка ТУ на конструкцию	Ведущий инженер	500	1	10	5000
7	Оформление документации	Техник Инженер	345 450	1 1	6 4	2070 1800
ИТОГО						44920

Таблица 3.4 – Комплектующие одной МЭС мощностью 3 кВт

№ п/п	Наименование	Мощность, Вт	Количество	Цена, руб за шт.	Общая цена, руб
1	Роторная ВЭУ YASHEL WT300	200	1	38400	38400
2	Солнечный модуль PLM-250P-60	250	2	16500	33000
3	Базовая АБ модель GX12-60	60 А·ч	1	32000	32000
4	ВЭМП на базе электродвигателей серии ХМ6360ЕА-V3	2000	2	17000	34000
5	Контроллер PWM 2440		1	4100	4100
6	Комплектующие, включая каркас, разъемы, провода и т.п.				5000
Итого:					146500

Учитывая нормативную рентабельность, валовую прибыль принимаем в размере 25 % от себестоимости:

$$П_B = 241323 \cdot 0,25 = 60331 \text{ руб.} \quad (3.5)$$

Тогда оптовая цена установки составит

$$Ц_{ОПТ} = C_{П} + П_B = 241323 + 60331 = 301654 \text{ руб.} \quad (3.6)$$

Договорная цена с учетом 18 % НДС составит:

$$Ц_{ДОГ} = 301654 \cdot (1 + 0,18) = 355952 \text{ руб.} \quad (3.7)$$

Чистая прибыль от реализации одной МЭС с учетом налога на прибыль (НП):

$$П_ч = П_B \cdot \left(1 - \frac{НП}{100}\right) = 60331 \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 48265 \text{ руб.} \quad (3.8)$$

Годовая прибыль от реализации 100 шт. МЭС составит:

$$П_Г = П_ч \cdot n = 48265 \cdot 100 = 4826500 \text{ руб.} \quad (3.9)$$

При расчете капитальных затрат (КЗ) на производство 100 шт. МЭС, учитываются затраты на проведение НИОКР ($З_{НИОКР}$) и затрат на освоение производства и доработку опытных образцов, корректировку документации (КД):

$$К_З = З_{НИОКР} + 1,05(n \cdot C_{П}) = 231323 + 1,05(100 \cdot 241323) \approx 25,6 \text{ млн руб.} \quad (3.10)$$

Оборотные средства принимаются в размере 10 % от себестоимости среднегодового выпуска продукции

$$К_{ОС} = 0,1(n \cdot C_{П}) = 0,1(100 \cdot 241323) = 2,413 \text{ млн. руб.} \quad (3.11)$$

Капиталовложения в производственные фонды ($К_{ПФ}$) с учетом, что производство осуществляется на имеющемся оборудовании предприятия (капиталовложения в основные фонды составляет $К_{ОФ} = 200\,000 \text{ руб.}$):

$$К_{ПФ} = К_{ОС} + К_{ОФ} = 2,413 + 0,2 \approx 2,613 \text{ млн руб.} \quad (3.12)$$

Полные капиталовложения будут в размере:

$$К_{П} = К_З + К_{ПФ} = 25,6 + 2,613 = 28,22 \text{ млн руб.} \quad (3.13)$$

Для реализации проекта берется кредит в Сбербанке $K_K = 28,22$ млн руб. под 15 % (E_K) годовых с равномерными выплатами по кредиту в течение $T_K = 10$ лет.

Расчет выплат по кредиту проводится по формуле:

$$K_m = \frac{E_K(1+E_K)^{T_K}}{(1+E_K)^{T_K}-1} \cdot K_{\Pi} = \frac{0,15(1+0,15)^{10}}{(1+0,15)^{10}-1} \cdot 28220000 = 5558766 \text{ руб.}, \quad (3.14)$$

где K_m – платеж на m -том шаге с учетом процентов.

Полученная сумма будет выплачиваться ежегодно в течение $T = 10$ лет, при этом, общая сумма выплаты по кредиту составит:

$$K_m = 5558766 \cdot 10 = 55587660 \text{ руб.} \quad (3.15)$$

Чистый дисконтированный доход:

$$\text{ЧДД} = \sum_{m=1}^T \frac{\Pi_{Г1} - K_m}{(1+E)^m} - K_{\Pi}, \quad (3.16)$$

где $E = 0,15$ – норма дисконта.

Расчет ЧДД проведем на 6 лет реализации проекта:

$$\text{ЧДД} = \sum_{m=1}^7 \frac{4826500 - 55587660}{(1+0,15)^7} - 28220000 = 4\,750\,396 \text{ руб.}, \quad (3.17)$$

Таким образом, через 7 лет после эксплуатации МЭС они будут приносить прибыль, поскольку капитальные затраты окупаются с учетом ежегодной выплаты кредита. Через 7 лет предприятие может выпускать МЭС за счет собственных средств без кредита. Основные результаты технико-экономического расчета приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты технико-экономического расчета

№ п/п	Критерии оценки	Показатели
1	Затраты на НИОКР, млн руб	0,231
2	Себестоимость производства одной установки, млн руб	0,302
3	Годовая прибыль от реализации одной установки, млн руб	4,827
4	Количество выпускаемых МЭС, шт.	100
5	Полные капиталовложения, млн руб	28,22
6	Кредит, млн руб	28,22
7	Ежегодный платеж по кредиту, млн руб	5,559
8	Срок окупаемости, лет	7

3.4 Выводы

Для подтверждения теоретических положений и результатов моделирования изготовлен испытательный стенд ВЭМП.

По результатам экспериментальных исследований получены механические характеристики двигателя и генератора ВЭМП. Установлено, что они имеют характерную линейную зависимость угловой скорости от момента с точкой перегиба при моменте равном 0,2 от момента номинального. Доказано, что жесткость характеристик на рабочих участках имеет значение 0,003 н·м·с. При приложении нагрузки жесткость механической характеристики генератора изменяется от 0,001 до 0,007.

По экспериментальным исследованиям генератора ВЭМП установлено, что зависимость выходного напряжения от нагрузки при постоянной установленной регулятором скорости двигателя имеет падающий линейный вид. При малых частотах вращения установки характеристики имеют также точку перегиба с изменением жесткости характеристики.

Зависимость выходной мощности от нагрузки показало наличие оптимальных режимов работы на отдельных скоростях работы установки.

В результате записи тока электродвигателя при пуске и последующем изменении режимов работы показало следующее: при пуске появляется переходный процесс с бросками тока, что совпадает с графиками моделей в ПО; при регулировании переходные процессы тока в двигателе и генераторе происходят плавно с небольшими колебаниями; длительность переходных процессов в двигателе и генераторе при регулировании скорости и изменении нагрузки находится в таком интервале как и при моделировании – 3–4 с; постоянная времени выпрямителя напряжения рекомендованная в ПО составила 2,5 с, что подтвердилось в экспериментах и привело к устранению колебаний тока в генераторе при переходных процессах.

Показано, что масса энергетического оборудования МЭС на базе ВИЭ и ВЭМП в 1,7 раз меньше массы автономной станции, выполненной на базе

БЭС и ЗУ, выполненного на полупроводниковых приборах. При этом, ресурс непрерывной работы ВЭМП превышает 30 тыс. ч., что выгодно отличает МЭС от станции на БЭС.

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 электростанции на гибридных инверторах.

Однако с учетом длительного периода эксплуатации автономных электростанций, преимущества электростанции на ВЭМП очевидны. Здесь, важным показателем является то, что ЗУ на ВЭМП могут осуществлять заряд АБ с разными номинальными значениями в соответствии с характеристиками, приведенными в таблицах 1.1 и 1.2.

Проведено технико-экономическое обоснование постановки на серийное производство 100 шт. МЭС. Затраты на НИОКР составляют 231 тыс. руб. При этом капитальные вложения составляют 28,22 млн руб. Отпускная цена одной установки составляет 301,65 тыс. руб. Срок окупаемости МЭС около 7 лет с учетом 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 элек-

тродвигателя 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 про-

изводителей 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 агрегатирования силовых элементов МЭС. Необходимо продолжить исследования по использованию ВЭМП для подключения других потребителей: сварочные аппараты, электроприводы рабочих машин сельскохозяйственного назначения.

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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБ	– аккумуляторная батарея;
АИ	– автономный инвертор;
АИЭ	– автономный источник электроэнергии;
АСУ	– автоматическая система управления;
АСЭ	– автономная система электроснабжения;
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат;
БЭМ	– бесконтактная электрическая машина;
БЭС	– бензоэлектростанция;
ВИЭ	– возобновляемые источники энергии;
ВЭМП	– высокоскоростной электромашинный преобразователь;
ВЭУ	– ветроэнергетическая установка;
ДПТ	– двигатель постоянного тока;
ДЭС	– дизель-электрическая станция;
ЗУ	– зарядное устройство;
К	– контроллер;
КПД	– коэффициент полезного действия;
МГП	– массогабаритные показатели;
МЭС	– мобильная электростанция;
Н	– нагрузка;
НПЧ	– непосредственный преобразователь частоты;
ПН	– преобразователь напряжения;
ПЧ	– преобразователь частоты;
РН	– регулятор напряжения;
РС	– регулятор скорости;
САУ	– система автоматического управления;
СБ	– солнечная батарея;
СИ	– солнечный инвертор;
СГ	– синхронный генератор;

- СУ – система управления;
- СФЭУ – солнечная фотоэлектрическая установка;
- СЭС – система электроснабжения;
- ФЭ – функциональный элемент;
- Ш – шина подключения нагрузки;
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция;
- ЭТХ – эксплуатационно-технические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономное электроснабжение объектов на основе возобновляемых источников энергии / М. М. Украинцев, П. Т. Корчагин, С. М. Воронин, И. В. Юдаев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, № 1(63). – С. 482-492. – DOI 10.21177/1998-4502-2025-17-1-482-492.
2. Ахмед Торки Ахмед Джайлани Автономные системы электро-снабжения фермерских хозяйств Египта с использованием возобновляемых источников энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Ахмед Торки Ахмед Джайлани. – Москва, 2010. – 144 с.
3. Баракин, Н. С. Исследование Зарядных устройств для БПЛА / Н. С. Баракин, С. В. Оськин, И. А. Кулаков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 188. – С. 1-9. – DOI 10.21515/1990-4665-188-001.
4. Бесщеточный мотор для самолета [Электронный ресурс]. – URL: https://aliexpress.ru/item/1005001405419074.html?ysclid=mbxr9vlse2764430504&sku_id=12000034935446511 (Дата обращения 12.12.2024).
5. Велькин, В.И. Использование цифровых технологий в исследовании возобновляемых источников энергии / В. И. Велькин, С. Е. Щеклеин, Ю.Е.Немихин [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 25–27 (347–349). – С. 165–183.
6. Велькин, В.И. Возобновляемая энергетика и энергосбережение : учебник / В. И. Велькин, Я. М. Щелоков, С. Е. Щеклеин ; под общей ред. В. И. Велькина. – 2-е изд. – М. : ФЛИНТА, 2022. – 312 с.
7. Ветро-солнечные электростанции фермерских хозяйств / О. В. Григораш, Е. А. Денисенко, Д. Н. Грищенко, П. М. Барышев // Техника и оборудование для села. – № 3 (309). – 2023. – С. 36–40.
8. Ветро-солнечный генератор и его характеристики [Электронный ресурс] / Я.М.Кашин, Л.Е.Копелевич, И.Б.Самородов [и др.] // Электронный

сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2019. – № 6. – С. 201–214. – Режим доступа : <https://ntk.kubstu.ru/tocs/66>.

9. Ветросолнечная двухвходовая генераторная установка / Я. М. Кашин, А. М. Квон, Л. Е. Копелевич [и др.] // Сельский механизатор. – 2019. – № 7. – С. 32–34.

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

11. Воробьев, Е.В. Параметры и режимы работы автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки малых фермерских и личных подсобных хозяйств : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.02 / [Место защиты: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – Краснодар, 2022. – 124 с. : ил.

12. Гайтов, Б.Х. Разработка конструкций двухвходовых генераторных установок на основе возобновляемых источников энергии / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич и др. // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2018. – № 2–3. – С. 94–99.

13. Гайтов, Б.Х. Ветро-солнечный генератор для систем автономного электроснабжения / Б.Х.Гайтов, Я.М.Кашин, Л.Е.Копелевич [и др.] // Электричество. – 2018. – № 1. – С.19–27.

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

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

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. Стабилизация напряжения и частоты тока ветроэнергетической установки / О. В. Григораш, О. Я. Ивановский, Д. В. Головин // Национальная ассоциация ученых. – 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. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках / О.В.Григораш, А.С.Туаев, А.Э.Коломейцев // Сельский механизатор. – 2020. – № 7. – С. 28–29.

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

22. Григораш, О.В. Востребованность солнечных электростанций в фермерских и личных подсобных хозяйствах / О.В.Григораш, Е.В.Воробьев, А.Э.Коломейцев // Сельский механизатор. – 2021. – № 12. – С. 32–33.

23. 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.

24. Григораш, О.В. Системы бесперебойного электроснабжения на возобновляемых источниках / О.В. Григораш, А.Э.Коломейцев, Т.С.Бойко // Сельский механизатор. – 2022. – № 9. – С. 23–25.

25. Дайчман, Р.А. Расчет ветро-солнечной установки малой мощности / Р.А. Дайчман // Молодой ученый. – 2016. – № 10 (114). – С.169-173.

26. Денисенко, Е.А. Использование ветро-солнечных агрегатов для автономного электроснабжения малых фермерских хозяйств / Е.А. Денисенко, А.Д. Сидоренко // В сборнике: Технические и технологические системы. Материалы тринадцатой Международной научной конференции. Краснодар. – 2022. – С. 200–201.

27. Денисов, В.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / под ред. В.В.Денисова. – Ростов н/Д : Феникс, 2015. – 382 с.

28. Даус, Ю.В. Ресурсный потенциал солнечной энергии для установок, использующих ее в системе энергоснабжения потребителей г. Волжского [Электронный ресурс] / Ю.В.Даус, Н.М.Веселова, И.В.Юдаев, С.А.Ракитов // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 129. – С. 297–307. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2017/05/pdf/25.pdf>.

29. Даус, Ю. В. Оценка ресурса солнечной энергии территории объекта АПК / Ю. В. Даус, И. В. Юдаев // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3(77). – С. 137–145. – DOI 10.24411/2078-1318-2024-3-137-145.

30. Елистратов, В.В. Возобновляемая энергетика : монография / В. В. Елистратов. – 3-е изд., доп. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 424 с.

31. Елифанов, А. П. Электромеханические преобразователи энергии : учебное пособие для вузов / А. П. Елифанов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 208 с.

32. Защищенная от внешних воздействий энергоустановка автономного электроснабжения / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, П. В. Коноплев, А. В. Бобрышев // Сельский механизатор. – 2023. – № 4. – С. 33. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-4-33-44.

33. 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.

34. 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.

35. Ивановский, О. Я. Статические преобразователи электроэнергии с промежуточным звеном повышенной частоты / О. Я. Ивановский, Г. С. Отмахов // Механизмы управления процессами внедрения технических новшеств : сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 15 октября 2017 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2017. – С. 53–55.

36. 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.

37. Ивановский, О.Я. Мировая солнечная энергетика: состояние и перспективы / О.Я. Ивановский, А.Э. Коломейцев, М.А. Калюта // В сборнике: Innovation science. Сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 62–64.

38. Исембергенов, Н. Т. Электромашинные преобразователи на базе асинхронизированных машин для нетрадиционных источников энергии : автореф. дис. ... д.т.н. : 05.09.03 / Исембергенов Налик Турегалиевич. – Алматы, 2002. – 34 с.

39. Каабече, А. Техничко-экономическая оптимизация гибридной фотоэлектрической/ветровой/дизельной/батарейной генерации в автономной энергосистеме [Электронный ресурс] / А.Каабече, Р.Ибтиуэн // Солнечная энергия, 10.3 – С. 171–182. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.017>.

40. Кабдин, Н.Е. Электропривод: учебник / Н.Е. Кабдин, В.Ф. Сторчевой. – М.: МЭСХ, 2021. – 286 с.

41. Квитко, А.В. Перспективы и особенности работы солнечных фотоэлектрических станций [Электронный ресурс] / А.В.Квитко, Г.С.Отмахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. –2017. –№ 131(07). – С. 56–68. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/07/pdf/07.pdf>.

42. Коломейцев А.Э. Параметры и режимы работы мобильной ветро-солнечной электростанции малых фермерских хозяйств : дис. ... канд. техн. наук : 4.3.2 / Коломейцев Александр Эдуардович. – Краснодар, 2024. – 124 с.

43. Комбинированные энергетические установки в животноводстве / А. Г. Фиапшев, А. Б. Барагунов, Т. Х. Пазова [и др.] // Сельский механизатор. – 2025. – № 2. – С. 19-21. – DOI 10.47336/0131-7393-2025-2-19-20-21-24.

44. Конников, В. А. Проект энергообеспечения обсерватории урфу микрогенерирующей установкой на основе ВИЭ / В. А. Конников, В. О. Меньков, В. И. Велькин // Ural project of energy conference 2022 : сборник статей участников Всероссийской конференции с международным уча-

стием, Екатеринбург, 19 декабря 2022 года. – Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур», 2023. – С. 66–70.

45. 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.

46. Копылов, И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 669 с.

47. Кочуров, А. А. Теоретические основы решения проблемы увеличения сроков службы аккумуляторных батарей при хранении и повышения эффективности способов их восстановления: монография / А.А. Кочуров, В.Ю. Гумелев, Н.П. Шевченко; под общ. ред. А.А. Кочурова. – Рязань: Ряз. высш. возд.-дес. ком. уч-ще (воен. ин-т), 2012 – 252 с.

48. Кувшинов, А.А. Теория электропривода. Часть 3. Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А. А. Кувшинов, Э. Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с.

49. Лаврик, А.Ю. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами / А.Ю. Лаврик, Ю.Л. Жуковский, А.Ю. Лаврик, А.Д. Булдыско // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т.22. – № 1. – С.10–17.

50. Лукитин, Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.

51. Лукитин, Б.В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б.В.Лукитин, И.О.Муравлев, И.А.Плотников. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – 2015. – 128 с.

52. Маккалли, Дж.К. Мобильная элементарная электростанция [Электронный ресурс] / Дж.К.Маккалли // (MEPP). 2013 1st Конференция IEEE по технологиям устойчивого развития(SusTech), Портленд, 1–2 августа 2013. – С. 109–113. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/SusTech.2013.6617306>.

53. Маковский, А.Л. Силовые преобразователи электрической энергии в технических системах управления. Учебное пособие. / Маковский А.Л. – Минск : БГУИР, 2017 – 250 с.

54. Матвеев, А. В. Тестирование гипотезы о зависимости массы электрических машин от мощности и частоты вращения / А. В. Матвеев // Электричество. – 2021. – № 7. – С. 4–18.

55. Методика расчета магнитной системы осесимметричной цилиндрической модели синхронного генератора с двухконтурной магнитной системой / Г. В. Никитенко, И. В. Атанов, Е. В. Коноплев, А. А. Лысаков // Электротехника. – 2022. – № 7. – С. 23-27. – DOI 10.53891/00135860_2022_7_23.

56. Методики расчета экономической эффективности возобновляемых источников энергии сельских территорий / А. А. Шевченко, Е. А. Сапрунова, Е. А. Денисенко, А. В. Квитко // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 4(144). – С. 28–33.

57. Мобильная гибридная ветровая и солнечная электростанция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mobismart.ca/mobile-hybrid-wind-solar-system/новости_120481.htm (по состоянию на 10 мая 2021 г.).

58. Мобильные ветро-солнечные гибридные электростанции мощностью от 3 до 12 кВт с резервным ДГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cs3.a5.ru/media/45/7a/25/457a25dde268a7b2bd02395659a3386f.pdf>.

59. Мобильные ветро-солнечные электростанции: состояние, перспективы и особенности проектирования / О.В.Григораш, Е.А.Денисенко, Д.Н.Грищенко, П.М.Барышев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – Т. 23, № 1, 2023. – С. 48–55.

60. Моделирование ветроэнергетической установки в программе SimInTech / Н. С. Баракин, С. В. Оськин, Д. А. Овсянников, Д. А. Таранов // Сельский механизатор. – 2023. – № 5. – С. 35–37. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-5-35-36-37.

61. Национальный стандарт РФ. Возобновляемые источники энергии. Технические требования к фотоэлектрическим солнечным станциям [Элек-

тронный ресурс] : ГОСТ Р 70787–2023. – Введ. 2023–08–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/03c45946-8c93-46a7-96ca-4b4e50419bab>.

62. Национальный стандарт РФ. Модули фотоэлектрические [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 58809.1–2020. – Введ. 2021–01–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/790e7ba4-9b3a-4d57-a0ee-934ef5da8d3d>.

63. Национальный стандарт РФ. Системы фотоэлектрические автономные. Проверка работоспособности [Электронный ресурс] : ГОСТ Р МЭК 62124–2013. – Введ. 2015–01–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/0c857650-8e51-4352-8641-d18eb56376c1>.

64. Национальный стандарт РФ. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 51991 – 2002. – Введ. 2003–07–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/7d874f37-a3f1-4a48-87f5-40f0c11c4b07>.

65. Национальный стандарт РФ. Установки ветроэнергетические. Ч. 2. Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам [Электронный ресурс] : ГОСТ 54418.2 – 2014. – Введ. 2016–07–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/ad41fdf6-0a9e-4419-b5ad-1b76161d48f4>.

66. Национальный стандарт РФ. Электроэнергетика. Распределенная генерация. Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 58491–2019. – Введ. 2020–01–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/498b71b3-af7e-4945-834a-aa694ee1bc91>.

67. Никитенко, Г.В. Ветро-солнечная система автономного электропитания / Г.В.Никитенко, Е.В.Коноплев, А.А.Лысаков // Сельский механизатор. – 2018. № 4. – С. 28–29.

68. Никитенко, Г. В. Автономная система электроснабжения с высокоскоростным регулятором стабилизации оборотов асинхронного генератора : монография / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, А. В. Бобрышев. – Ставрополь : Издательство «АГРУС», 2020. – 156 с. – ISBN 978-5-9596-1705-9.

69. Новая элементная база возобновляемых источников электроэнергии : монография / О.В. Григораш, А.Ю. Попов, Е.В. Воробьев, О. Я. Ивановский, А.С. Туаев. – Краснодар : КубГАУ. 2018. – 202 с.

70. Оськин, С. В. Автоматизированный электропривод / С. В. Оськин. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Краснодар : КРОН, 2014. – 510 с. – ISBN 978-5-94672-600-9.

71. Оськин, С. В. Пути снижения себестоимости продукции мелкими товаропроизводителями / С. В. Оськин, М. И. Потешин, Д. М. Таранов // Сельский механизатор. – 2022. – № 5. – С. 4–5.

72. Патент № 2457598 С1 Российская Федерация, МПК H02J 9/06. Устройство бесперебойного электроснабжения : № 2011123069/07 : заявл. 07.06.2011 : опубл. 27.07.2012 / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. Е. Усков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

73. Патент № 2688211 С1 Российская Федерация, МПК H02K 16/04, H02K 19/16. Двухвходовая ветро-солнечная аксиально-радиальная электрическая машина-генератор : № 2018128655 : заявл. 03.08.2018 : опубл. 21.05.2019 / Я. М. Кашин, А. С. Князев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»).

74. Патент № 2655379 С1 Российская Федерация, МПК H02K 7/18, H02K 21/38, H02K 16/00. Синхронизированный аксиальный двухвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор : № 2017113228 : заявл. 17.04.2017 : опубл. 28.05.2018 / Я. М. Кашин, А. Я. Кашин, Л. Е. Копелевич [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»).

75. Патент № 2685424 С1 Российская Федерация, МПК Н02К 7/18, Н02К 19/38, Н02К 29/00. Стабилизированная двухвходовая ветро-солнечная аксиально-радиальная электрическая машина-генератор : № 2018128657 : заявл. 03.08.2018 : опубл. 18.04.2019 / Я. М. Кашин, А. Я. Кашин, А. С. Князев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»).

76. Патент № 2726867 С2 Российская Федерация, МПК Н02К 15/02, Н02К 1/28. Способ согласования магнитопроводов ротора и якоря в двухмерных электрических машинах-генераторах : № 2019100594 : заявл. 10.01.2019 : опубл. 16.07.2020 / Б. Х. Гайтов, Я. М. Кашин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»).

77. Патент № 2748225 С1 Российская Федерация, МПК Н02К 16/00, Н02К 3/22, Н02К 19/38. Вертикально-осевая трехвходовая аксиальная генераторная установка : № 2020134498 : заявл. 20.10.2020 : опубл. 21.05.2021 / Я. М. Кашин, А. С. Князев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова».

78. Патент № 2759598 С1 Российская Федерация, МПК Н02К 47/02, Н02К 19/38. Стабилизированная трехвходовая аксиально-радиальная электрическая машина-генератор : № 2021109026 : заявл. 01.04.2021 : опубл. 16.11.2021 / Я. М. Кашин, А. С. Князев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего об-

разования «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова».

79. Патент № 2836736 С1 Российская Федерация, МПК F03D 9/00, H02S 10/12, F03D 7/00. Гибридный энергетический комплекс : заявл. 12.08.2024 : опубл. 20.03.2025 / Я. М. Кашин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова».

80. Патент № 2839659 С1 Российская Федерация, МПК H02K 19/38, F03D 9/25. Автономная ветросолнечная генераторная установка : заявл. 18.11.2024 : опубл. 07.05.2025 / Я. М. Кашин, А. С. Князев, Н. Е. Ярьско ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова».

81. Первые результаты эксплуатации фасадной солнечной электростанции УрФУ / А. В. Матвеев, Ю. Е. Немихин, С. Е. Щеклеин, В. И. Велькин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 11(428). – С. 32-37. – DOI 10.15518/isjaee.2024.11.032-037.

82. Передвижные энергетические установки в отгонном животноводстве / Б. А. Фиापшев, А. Г. Фиапшев, О. Х. Кильчукова [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2025. – Т. 72, № 1(58). – С. 117–124. – DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-1-117-124.

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

84. Повышение энергетической эффективности отраслей агропромышленного комплекса / С. В. Оськин, А. В. Коржаков, И. Н. Шишигин, А. А. Лоза // Сельский механизатор. – 2022. – № 1. – С. 42–43.

85. Попов, В. И. Электромашинные преобразователи повышенной частоты совмещенного типа на базе серийных асинхронных машин / В.И. Попов, Ю.Н. Петров. – М. : Информэлектро, 1987. – 59 с.

86. Потенциал возобновляемых источников энергии на селе / О.В.Григораш, В.Н.Плешаков, Е.В.Воробьев, К.В.Пигарев // Сельский механизатор. – 2018. – № 7–8. – С. 32–33 с.

87. Проблемы и перспективы ветроэнергетики / А. Г. Фиапшев, М. М. Хамоков, О. Х. Кильчукова, Д. Г. Кармокова // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность : Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти Заслуженного деятеля науки РФ, КБР, Республики Адыгея профессора Б.Х. Фиапшеву, Нальчик, 22 марта 2023 года. – Нальчик: ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», 2023. – С. 255–257.

88. Развитие энергетики в мире и в России / Р. А. Амерханов, О. В. Григораш, Е. В. Воробьев, А. Э. Коломейцев, В. В. Мороз // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. № 2 (124). – С. 22–28.

89. Разработка конструкций двухвходовых генераторных установок на основе возобновляемых источников энергии / Б. Х. Гайтов, Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2018. – № 2-3(362-363). – С. 94-99. – DOI 10.26297/0579-3009.2018.2-3.25.

90. Рехман, З. Многовходовые преобразователи постоянного тока в приложениях возобновляемой энергии [Электронный ресурс] / З. Рехман, И. Аль-Бахадли, Мухопадхьяй. // Обзоры возобновляемых и устойчивых источников энергии. – 41. – С. 521–539. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.033>.

91. 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.

92. Савелов, П. И. Разработка конструкции мобильной солнечной электростанции / П. И. Савелов, Ю. Е. Лившиц // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 57-62. – DOI 10.35596/1729-7648-2020-18-3-57-62.

93. Сибикин, Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М. : Кнорус, 2010. – 232 с.

94. Силовая электроника в системах с нетрадиционными источниками электроэнергии / Ю.К.Розанов, Н.Н.Баранов, Б.М.Антонов, Е.Н.Ефимов, А.В.Соломатин // Электричество. – 2002. – № 3. – С. 20–28.

95. Система автономного электроснабжения / Е. В. Коноплев, Г. В. Никитенко, П. В. Коноплев, А. С. Сергиенко // Сельский механизатор. – 2022. – № 4. – С. 44.

96. Солнечные фотоэлектрические станции : монография / Р. А. Амерханов, О.В. Григораш, И.Б. Самородов, Б.К. Цыганков, Е.С. Воробьев. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – 206 с.

97. Способы оптимизации структурно-схемных решений ветро-солнечных электростанций / О.В.Григораш, С.В.Оськин, Е.А.Денисенко, Д.П.Харченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – Т. 23. – № 3. – 2023. – С. 34–40.

98. Структурно-схемные решения солнечных автономных инверторов / Григораш О.В., Воробьев Е.В., Денисенко Е.В., Барышев П.М. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 2 (70). – С. 439–450.

99. Схемы электроснабжения сельских потребителей / С. В. Оськин, А. В. Ефанов, В. А. Ярош, С. С. Ястребов // Сельский механизатор. – 2020. – № 3. – С. 26–27.

100. Туаев, А.С. Способы отбора электрической энергии от солнечных батарей / А.С.Туаев, С.Джибо, А.Э.Коломейцев // В сборнике: Достижения и перспективы развития молодежной науки. сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 279–285.

101. Усков, А.Е. Обоснование выбора параметров электроэнергии автономных систем электроснабжения/ А.Е.Усков // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2010. – № 6. – С. 121–124.

102. Усков, А.Е. Автономные инверторы солнечных электростанций : монография / А.Е.Усков : КубГАУ. – Краснодар, 2011. – 126 с.

103. Усольцев, А.А. Электрический привод: учебное пособие/ А. А. Усольцев. – СПб: НИУ ИТМО. – 2012. – 238 с.

104. Фиапшев, А. Г. Использование накопителей для повышения качества электроэнергии / А. Г. Фиапшев, А. А. Апажев, З. Р. Абдулхаликов // Материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства, природообустройства и механизации сельскохозяйственного производства». Нальчик, 2023. – С. 160–163.

105. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник / Т.А.Филиппова, Ю.М.Сидоркин, А.Г.Русина. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016 – 356 с.

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

107. Характеристики синхронизированной двухвходовой генераторной установки / Я. М. Кашин, А. М. Квон, Л. Е. Копелевич [и др.] // Сельский механизатор. – 2019. – № 8. – С. 34–35.

108. Экологически чистые и ресурсосберегающие альтернативные системы энергоснабжения сельскохозяйственных предприятий Кабардино-Балкарской Республики / А. Г. Фиапшев, А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев [и др.]. – Нальчик : Федеральное государственное бюджетное образователь-

ное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», 2022. – 178 с. – ISBN 978-5-89125-194-6.

109. Экономическое обоснование организационно-технических мероприятий в курсовых и дипломных проектах / С. В. Оськин, В. Я. Хорольский, О. А. Гончарова, А. И. Вандтке. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет, 2008. – 108 с.

110. Электрооборудование возобновляемой энергетики : учебник / Р. А. Амерханов, О. В. Григораш, А. А. Шевченко, А. Е. Усков, А. А. Азарян. – Краснодар : КубГАУ, 2023. – 228 с.

111. Энергоэффективные и энергосберегающие автономные системы электроснабжения на ветро-солнечных электростанциях для малых фермерских хозяйств : монография / О. В. Григораш, Е. А. Денисенко, А. В. Квитко, Д. Н. Грищенко, П. М. Барышев. – Краснодар : КубГАУ, 2023. – 180 с.

112. Юдаев, И.В. Солнечная электроэнергетика Юга России: имеющийся потенциал, эксплуатируемые объекты, перспективы развития / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус // В сборнике: Альтернативная энергетика в регионах России «АЭР-2018». – 2018. – С. 45–49.

113. Юдаев, И. В. Возобновляемые источники энергии : учебник / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, В. В. Гамага. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2020. – 328 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-8114-4680-3.

114. An Optimized Multi-Stage Charging Algorithm for Lithium-Ion Batteries / Aydın Güler, Yusuf Çetinkaya, Selim Atmaca, Mehmet Karakoyunlu, Erhan Tunçel // Energies, vol. 14, no. 13, p. 3958, 2021.

115. Analysis of Battery Charging Performance Under Different Temperatures / Xiaohui Zhang, Yongsheng Zhang, Haibo Yu, Changzheng Liu // Applied Thermal Engineering, vol. 198, p. 117445, 2021.

116. Advanced Charging Strategies for High-Powered Lithium Batteries / Tsai, H.Y.; Ho, S.J.; Wang, Y.H.; Chen, J.F. // Applied Energy, Volume 287, April 2021, p. 116533.

117. Battery Charging System with Real-Time Adjustment Capabilities / Sayantan Banerjee, Kaushik Roy, Arup Das // *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 4965, 2021.

118. Battery Health Assessment Methods During Charging Process / Ashraf, M.U.; Ali, H.; Khan, A.S.; Rehman, M.Z. // *Journal of Cleaner Production*, Volume 313, June 2021, Article number 127754.

119. Barakin, N.S. Computer Simulation on the Basis of SIMINTECH Asynchronous Wind Generator [Electronic resource] / N.S.Barakin, A.V.Bogdan, A.V.Kvitko // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 186-191, doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139043. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10139043>.

120. Bogatyrev, N. WPP with an Autonomous Valve Generator for Combined Operation with Solar Panels [Electronic resource] / N.Bogatyrev E.Denisenko, V.Parhomenko // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 164-169, doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138973. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10138973>.

121. Development of a mobile autonomous solar power plant for the needs of agriculture [Electronic resource] / S.Z.Tokmoldin, V.V.Klimenov, D.V.Girin, N.A.Chuchvaga, K.P.Aimaganbetov, M.P.Kishkenebaev, S.N.Tarakanova, N.S.Tokmoldin // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(2):125-

136. (In Russian). – Access mode : <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-125-136>.

122. Electromagnetic compatibility of functional elements of autonomous power supply systems [Electronic resource] / A.N. Sobol, S.N. Begday, A.A. Andreeva, A.E. Kolomeytsev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 488, Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) 21–22 October 2019, Stavropol, Russia.

doi:10.1088/1755-1315/488/1/012039. – Access mode : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/488/1/012039>.

123. Evaluation of Rapid Charging Impact on Lithium-Ion Battery Capacity Retention / Weiwei Zhao, Yunqiang Wang, Junhua Zhao, Bin Xu // *Materials Today Communications*, vol. 28, p. 102811, 2021.

124. Fast-Charging Algorithms for Extended Life Cycle of Lithium-Ion Batteries / Tan, Z.; Yang, H.; Mao, Y.; Wen, Y.; Xu, Y. // *Sustainability*, Volume 13, Issue 14, July 2021, p. 7648.

125. Grigorash, O. Mobile Compact Solar Power Plant for Small Farms [Electronic resource] / O.Grigorash, V.Tropin, P.Baryshev // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 146-151, doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138993. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10138993>.

126. Improved Charging Techniques for Long-Life Lithium-Ion Batteries / Mei, Y.; Hu, Y.; Zhao, H.; Su, J.; Pan, C. // *Renewable Energy*, Volume 172, September 2021, pp. 1104-1116.

127. Integrated Safety Mechanisms for Fast-Charging Lithium-Ion Batteries / Calvo, A.; de la Rosa, F.; Correa, A.; Ramírez, M. // *Energy Reports*, Volume 7, June 2021, pp. 651-662.

128. Modular aggregation functions performed by static inverters in autonomous power supply systems [Electronic resource] / O.V.Grigorash, A.Y.Popov, A.E.Uskov, E.A.Denisenko, A.V. Kvitko // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 488 012018, doi:10.1088/1755-1315/488/1/012018. – Access mode : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/488/1/012018>.

129. Optimum Charging Profile Selection for Maximum Battery Life / Hamza Ben Taïeb, Walid Marrakchi, Souhir Boussarsar, Imed Riadh Farhat // *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10158, 2021.

130. Real-time Monitoring and Diagnostic Framework for Lithium-Battery Charging Stations / Nguyen, H.D.; Pham, Q.B.; Tran, H.N.; Le, T.Q. // Computers & Electrical Engineering, Volume 93, February 2021, Article number 107183.

131. State-of-the-art Monitoring and Protection Schemes for Lithium-Ion Battery Packs / Patel, M.K.; Reddy, G.V.P.; Kumar, S.R. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 131, October 2021, Article number 106964.

132. Strebkov, D.S Improving the Efficiency of Solar Power Plants [Electronic resource] / D.S.Strebkov, Y.Kh.Shogenov, N.Yu.Bobovnikov// Engineering Technologies and Systems 30 (3): 480-497, Sept 2020, doi: 10.15507/2658-4123.030.202003.480-497. – Access mode : <https://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/92-20-3/804-10-15507-0236-2910-030-202002-9>.

133. Trofimov, L.N. Optimization of Capacities of Wind and Solar Power Plants in the Interstate Power Grid in North-East Asia Taking Into Account the Intermittence of Their Power Output [Electronic resource] / L.N.Trofimov, I.L.Trofimov // E3S Web of Conferences 209, 04005 (2020). – Access mode : <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020904005>.

134. Uninterruptible power supply for renewable energy sources [Electronic resource] / O.V.Grigorash, A.Y.Popov, E.V.Vorobev, O.Y.Ivanovsky, A.S.Tuaev // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 488 012017, doi: 10.1088/1755-1315/488/1/012017. – Access mode : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/488/1/012017>.

135. Vertical axis wind power plant [Electronic resource] / P.Yu.Belyakov, Yu.V.Pisarevsky, A.V.Tikunov, A.Yu.Pisarevsky, T.E.Chernykh // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1035 012040, doi: 10.1088/1757-899X/1035/1/012040. – Access mode : <https://www.sci-hub.ru/10.1088/1757-899x/1035/1/012040>.

Приложение А. Акт об использовании результатов НИР
в ООО НТК «Солнечный центр»



- АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
- СВЕТОДИОДНЫЕ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ
- ЭНЕРГОСЕРВИСНЫЕ КОНТРАКТЫ

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «НТК «Солнечный центр»
И.Б.Самородов
16.09.2025 г.

А К Т

об использовании результатов НИР ФГБОУ ВО
«Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина» в ООО НТК «Солнечный центр» г. Краснодар

Мы, ниже подписавшиеся, от ООО НТК «Солнечный центр» инженер - Мараховский Е. А., от Кубанского госагроуниверситета - заведующий кафедрой д.т.н., профессор Григораш О. В., , составили настоящий акт о том, что кафедрой «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» переданы в ООО «Солнечный центр» разработанные соискателем Ивановским О.Я. под руководством профессора Григораш О.В. структурно-схемное решение мобильной электростанции на высокоскоростных электромашиных преобразователях и алгоритм работы системы автоматического управления (САУ).

Результаты исследований используются в ООО НТК «Солнечный центр», включающие новое структурно-схемное решение мобильной электростанции на высокоскоростном электромашином преобразователях и возобновляемых источниках, позволят разрабатывать энергоэффективные автономные системы электроснабжения малой мощности с хорошими удельными показателями по мощности и массе, а предложенный алгоритм работы САУ повысит эффективность разработки программного аппарата для прошивки микропроцессорной техники.

Инженер производственно-технического отдела
ООО НТК «Солнечный центр»

Е.А.Мараховский

От ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина», заведующий кафедрой

О. В. Григораш

Соискатель

О. Я. Ивановский

**Приложение Б. Акт об использовании результатов НИР
в ООО «Энерготехнологии-Сервис»**

Общество с ограниченной ответственностью

«Энерготехнологии-Сервис»

350042, г. Краснодар,
ул. Садовая, 223
тел. 8(861)251-77-67, 254-16-19
ets@nextmail.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Энерготехнологии-Сервис»

В.А. Бутузов

2025 г.



А К Т

об использовании результатов научных исследований
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина»
ООО «Энерготехнологии-Сервис» г. Краснодар

Мы ниже подписавшиеся от ООО «Энерготехнологии-Сервис» главный инженер, к.т.н. Бутузов В.В. от Кубанского госагроуниверситета заведующий кафедрой д.т.н., профессор Григораши О. В., составили настоящий акт о том, что кафедрой «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» передана в ООО «Энерготехнологии-Сервис» разработанная соискателем Ивановским О.Я. под руководством д.т.н., профессора Григораши О.В. методика инженерного расчета мобильной электростанции на возобновляемых источниках энергии, позволяющая определять оптимальные соотношения мощностей источников электроэнергии и емкости базовой аккумуляторной батареи.

Методика используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» и позволяет сократить сроки проектирования энергоэффективных автономных электростанций на возобновляемых (ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установках) и традиционных (аккумуляторные батареи и бензоэлектростанции) источниках энергии.

Главный инженер

В.В. Бутузов

От ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени Трубилина И.Т.»:

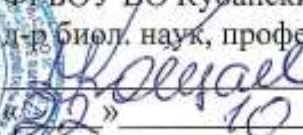
Заведующий кафедрой

О.В. Григораши

Соискатель

О. Я. Ивановский

Приложение В. Акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс
на факультете энергетики в Кубанском ГАУ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ
д-р биол. наук, профессор
 А.Г. Кошаев
«22» _____ 2025 г.



А К Т

о внедрении в учебный процесс результатов исследований по кандидатской
диссертационной работе соискателя Ивановского Олега Яковича
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина» на факультете энергетики

Мы, ниже подписавшиеся комиссия в составе:

председателя – декана факультета энергетики к.т.н., доцента Шевченко А.А.;
членов комиссии: заведующего кафедрой «Электротехники, теплотехники и
возобновляемых источников энергии», д.т.н., профессора Григораша О.В.;
профессора кафедры «Электроснабжения», д.т.н., профессор Юдаева И.В.
настоящим актом подтверждаем, что результаты исследований по кандидат-
ской диссертации «Параметры и режимы работы высокоскоростного элек-
тромашиного преобразователя мобильной электростанции на ВИЭ для по-
требителей АПК», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук, внедрены в учебном процессе на факультете энергетики.

Комиссия установила, что методика инженерного расчета мобильной
электростанции на возобновляемых источниках и технико-экономическая
оценка мобильных энергосистем диссертационного исследования соискателя
ивановского О.Я. применяются при изучении дисциплинам «Электрообору-
дование возобновляемой энергетики» и «Проектирование систем электро-
снабжения на возобновляемых источниках» на кафедре «Электротехники,
теплотехники и возобновляемых источников энергии».

Комиссия считает, что материалы кандидатской диссертации соискате-
ля Ивановского О.Я. соответствуют требованиям образовательного стандарта
по направлениям подготовки Агроинженерия 35.03.06, направленность
«Электрооборудование и электротехнологии», и Электроэнергетика и элек-
тротехника 13.03.02, направленность «Электроснабжение».

Председатель комиссии  А.А. Шевченко

Члены комиссии  О.В. Григораш

 И.В. Юдаев