


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

На правах рукописи



Коломейцев Александр Эдуардович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ МОБИЛЬНОЙ
ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
МАЛЫХ ФЕРМЕРСКИХ ХОЗЯЙСТВ**

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

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 ВОСТРЕБОВАННОСТЬ, ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАЛОЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ..... | 10 |
| 1.1 Востребованность возобновляемых источников энергии в малых фермерских хозяйствах | 10 |
| 1.2 Конструктивные решения и особенности работы мобильных электростанций на возобновляемых источниках | 15 |
| 1.3 Варианты построения мобильных электростанций на возобновляемых источниках и основные характеристики их функциональных элементов..... | 19 |
| 1.4 Энергетические и экономические показатели ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установок..... | 33 |
| 1.5 Выводы, цель и задачи исследований..... | 40 |
| 2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ И МЕТОДИКИ РАСЧЁТА МОБИЛЬНОЙ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ | 43 |
| 2.1 Разработка структурной схемы и алгоритма работы системы управления мобильной ветро-солнечной электростанцией | 43 |
| 2.2 Разработка методики расчёта мобильной ветро-солнечной электростанции..... | 47 |
| 2.3 Выводы | 57 |
| 3 РАЗРАБОТКА ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ | 59 |
| 3.1 Разработка функциональной схемы..... | 59 |
| 3.2 Разработка принципиальной электрической схемы..... | 65 |

| | |
|--|-----|
| 3.3 Разработка компьютерной модели инвертора | 72 |
| 3.4 Выводы..... | 80 |
| 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНВЕРТОРА, ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОБИЛЬНЫХ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ..... | 82 |
| 4.1 Методика и результаты экспериментальных исследований | 82 |
| 4.2 Способ определения рациональной структуры мобильной энергоустановки на основе экономических и массогабаритных показателей..... | 90 |
| 4.3. Техничко-экономическое обоснование постановки на серийное производство ветро-солнечных электростанций малой мощности..... | 92 |
| 4.4 Выводы..... | 98 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 100 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫЙ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 103 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 104 |
| Приложение А. Акт об использовании результатов НИР в ООО НТК «Солнечный центр»..... | 122 |
| Приложение Б. Акт об использовании результатов НИР в ООО «Энерготехнологии-Сервис»..... | 123 |
| Приложение В. Акт о внедрении результатов НИР в учебном процессе на факультете энергетики в Кубанском ГАУ | 124 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящий период аграрный сектор России является многоукладным хозяйством, где наряду с крупными хозяйствами существуют небольшие частные производители – фермерские и крестьянские хозяйства. Производительность малых фермерских хозяйств (МФХ), занимающихся производством мяса, рыбы, меда, молочных продуктов, шерсти, овощей и фруктов, удаленных от внешней энергетической системы, во многом определяется энергозатратами. Неисчерпаемость и экологическая чистота возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является перспективным направлением внедрения их в сельскохозяйственное производство.

Краснодарский край является перспективным регионом для внедрения ВИЭ из-за высокого уровня валового потенциала солнечной и ветровой энергетики. Сезонный характер сельскохозяйственного производства, небольшая мощность автономных потребителей электроэнергии и их рассредоточенность на большой территории являются основными особенностями МФХ. Эти факторы и современные достижения в области малой возобновляемой энергетики позволяют сделать вывод о необходимости разработки мобильных электростанций для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ.

Параметры и режимы работы, а также эксплуатационно-технические характеристики мобильных ветро-солнечных электростанций (МВСЭ) зависят от многих факторов: потенциала ВИЭ; параметров и режимов работы потребителей электроэнергии; мощности основных и резервных источников электроэнергии, включая емкости аккумуляторных батарей.

Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР Кубанского ГАУ на 2021–2025 гг. ГР № 121031700099-1, тема 32 «Обоснование и создание энергосберегающих адаптированных систем и технологий сельскохозяйственного назначения».

Степень разработанности темы. Научные проблемы разработки энергоэффективных солнечных и ветроэнергетических систем исследовали многие учёные: Амерханов Р.А., Безруких П.П., Борисов Р.И., Велькин В.И., Воронин С.М., Гайтов Б. Х., Елистратов В.В., Кашин Я. М., Коноплёв Е. В., Лукитин Б.В., Сибикин Ю.Д., Юдаев И.В. и другие авторы. Работы этих ученых посвящены разработке методик оценки потенциал ВИЭ, инженерного расчёта ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установок и систем, а также большое внимание уделено особенностям их проектирования и эксплуатации.

Проблематикой, ставшей предметом диссертационного исследования, занимались известные ученые Григораш О.В., Воронин С.М., Кирпичникова И.М., Козюков Д.А., Кузнецов П.Н., Никитенко Г.В., Пятикопов С.М., Усков А.Е., Шерязов С.К. и многие другие учёные. Их работы были посвящены улучшению технико-экономических и эксплуатационно-технических характеристик функциональных элементов ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установок, включая резервных источников электроэнергии. Однако вопросы разработки МВСЭ малой мощности с улучшенными массогабаритными и технико-экономическими показателями недостаточно исследованы.

Научными исследованиями в данной области в настоящее время занимаются ученые в образовательных учреждениях: Федеральном агроинженерном центре ВИМ, г. Москва; Южно-Уральском государственном университете (национально-исследовательский университет), г. Челябинск; Уральском федеральном университете, г. Екатеринбург; Кубанском государственном технологическом университете, г. Краснодар; Ставропольском государственном аграрном университете, г. Ставрополь.

Проблема состоит в том, что несмотря на большое разнообразие комплектации автономных электростанций на ВИЭ и научных разработок по данной теме сегодня отсутствуют мобильные энергетические установки малой мощности для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ.

Рабочая гипотеза состоит в том, что если провести научные исследования по определению рациональному соотношения мощностей ветровых и солнечных

энергоустановок, а также традиционных источников, и графика нагрузок автономных потребителей, то можно получить соответствующие закономерности, позволяющие разрабатывать МВСЭ с минимальными массогабаритными и высокими технико-экономическими показателями.

Целью диссертационного исследования является обоснование параметров и режимов работы мобильной ветро-солнечной электростанции с минимальными массогабаритными и высокими технико-экономическими показателями для электроснабжения автономных потребителей малых фермерских хозяйств.

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

1. Разработать структурную схему мобильной ветро-солнечной электростанции для автономных потребителей малых фермерских хозяйств и алгоритм работы автоматизированной системы управления станции в основных режимах её функционирования.

2. Разработать методику расчёта мобильной ветро-солнечной электростанции малой мощности, позволяющей определить ее параметры и режимы работы, а также рациональное соотношение мощностей отдельных источников энергии.

3. Разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы инвертора напряжения.

4. Разработать компьютерную модель инвертора напряжения и провести её исследования.

5. Разработать физическую модель инвертора, провести экспериментальные исследования и дать оценку достоверности полученных результатов.

6. Разработать способ определения рациональной структуры мобильной энергоустановки на основе экономических и массогабаритных показателей.

7. Провести технико-экономическое обоснование применения и производства мобильных электростанций.

Объектом исследования являются конструктивные решения ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установок, а также структурные схемы автономных систем электроснабжения.

Предмет исследования – параметры и режимы работы, показатели оценки эффективности мобильных автономных систем электроснабжения.

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

Научную новизну работы составляют:

- методика расчёта мобильной ветро-солнечной электростанции малой мощности, позволяющей определить ее параметры и режимы работы, а также оптимальное соотношение мощностей отдельных источников энергии;
- компьютерная модель инвертора напряжения в основных режимах его функционирования;
- алгоритм работы автоматизированной системы управления мобильной ветро-солнечной электростанцией;
- способ определения рациональной структуры мобильной энергоустановки на основе экономических и массогабаритных показателей.

Теоретическую и практическую значимость работы составляют:

- обоснованные параметры и режимы работы автономных потребителей электроэнергии малых фермерских хозяйств, занимающихся разными видами деятельности, позволяющие определить рациональное соотношение мощностей источников энергии мобильной ветро-солнечной электростанции;
- конструктивные решения автономных систем электроснабжения, которые позволят повысить эффективность проектных работ при разработках мобильных ветро-солнечных электростанций с минимальными массогабаритными и высокими технико-экономическими показателями и программного аппарата для прошивки микропроцессора системы управления;
- пример структурно-схемного решения мобильной ветро-солнечной электростанции и разработанный алгоритм работы её автоматической системы управления позволят повысить надёжность энергоснабжения фермерских хозяйств и

создать комфортные условия работникам сельского, занимающихся разными видами деятельности;

– предложенная методика расчета мобильной ветро-солнечной электростанции малой мощности, позволяет энергетикам хозяйств выбрать для нее энергооборудование с высокими технико-экономическими показателями;

– функциональная, принципиальная электрические схемы, компьютерная и физическая модель инвертора напряжения позволят производителям преобразовательной техники изготавливать данный тип устройств.

Положения, выносимые на защиту:

– методика расчёта мобильной ветро-солнечной электростанции малой мощности, позволяющей определить ее параметры и режимы работы, а также оптимальное соотношение мощностей отдельных источников энергии;

– компьютерная модель инвертора напряжения в основных режимах его функционирования;

– алгоритм работы автоматизированной системы управления мобильной ветро-солнечной электростанцией;

– способ определения рациональной структуры мобильной энергоустановки на основе экономических и массогабаритных показателей;

– результаты сопоставления компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций базируется на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, положений, в которых нашли применение предложенных авторов методиках расчёта и решения оптимизационных задач по разработке рациональных структур мобильных ветро-солнечных электростанций, полученные результаты расчёта параметров инверторов согласованные с известными теоретическими положениями науки, а также совпадением результатов компьютерного и физического моделирования.

Реализация результатов исследований. Методика инженерного расчёта, позволяющая определять параметры и оптимальные соотношения мощностей ис-

точников электроэнергии мобильных ветро-солнечных электростанций малой мощности, используется в ООО НТК «Солнечный центр» г. Краснодар (приложение А), математический аппарат для оценки эффективности мобильных энергосистем, выполненных на возобновляемых источниках, используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» г.Краснодар (приложение Б), результаты исследований внедрены в учебный процесс (приложение В).

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 Всероссийских и 5 Международных научно-практических конференциях: II Национальная конференция «Научно-техническое обеспечение АПК России» (г. Краснодар, 2018 г.); II Международная НПК, МНИЦ «Наукосфера» (г. Смоленск, 2019 г.); Международная НПК «Новая наука» (г. Петрозаводск, 2019 г.); Всероссийская национальная конференция «Научное обеспечение АПК» (г. Краснодар, 2019 г.); III Национальная конференция «Аграрная наука» (г. Краснодар, 2019 г.); IV Международная НПК (г. Краснодар, 2019 г.); IV Национальная конференция (г. Краснодар, 2021 г.); .V Международная НПК (г. Краснодар, 2021 г.); Международная НПК «Технологические инновации и научные открытия» (г. Уфа, 2021 г.).

1 ВОСТРЕБОВАННОСТЬ, ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАЛОЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

1.1 Востребованность возобновляемых источников энергии в малых фермерских хозяйствах

Согласно данным Росстата малыми формами хозяйствования ежегодно производится более 55 % от всего объема сельскохозяйственной продукции, произведенной в России, при этом, МФХ, которых более 14 тыс. в Краснодарском крае, производится более 50 % продукции от общероссийского объема, включая мяса около 47 %, молока – 38 %, овощей – 72 % и картофеля более 90 % [9, 17, 48]. Особенностью этих хозяйств является сезонное производство и некоторые из них удалены от внешней энергетической системы. При этом, одним из важных факторов открытия МФХ является наличие энергосети для энергообеспечения технологических процессов и жизнедеятельности обслуживающего персонала.

АИЭ, выполненные на базе традиционных источников энергии (бензоэлектростанции и дизельные электростанции), применяемых для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ имеют низкие эксплуатационно-технические характеристики, в том числе небольшой ресурс работы и оказывают отрицательное воздействие на экологию. Перспективным является направление разработки АСЭ на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Краснодарский край имеет высокий уровень потенциала ветровой и солнечной энергетики [3, 4, 5, 14, 33]. Поэтому перспективным является направление применения мобильных ветро-солнечных электростанций (МВСЭ) для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ [10, 11, 47, 50, 52, 73, 74–76].

Отличительной чертой МФХ является нестабильное потребление электроэнергии. Периоды, когда нет необходимости в электроснабжении некоторых по-

требителей электроэнергии МФХ могут достигать несколько недель. Таким образом, эффективно могут быть использованы ветроэнергетические и солнечные фотоэнергетические установки (ВЭУ и СФЭУ) для электроснабжения потребителей электроэнергии МФХ, поскольку характер поступления энергии от них также нестабильный. Для повышения надежности электроснабжения автономных потребителей МФХ в составе автономной системы электроснабжения (АСЭ) необходимо использовать в качестве резервных источников традиционные автономные источники бензиновые или дизельные станции, а также аккумуляторные батареи. В этом случае они будут иметь значительно меньшую установленную мощность и, соответственно ниже уровень капитальных и эксплуатационных затрат.

В общем случае энергоэффективность АСЭ, выполненных на ВИЭ повышается за счёт того, что основными источниками электроэнергии для автономных потребителей являются ВЭУ и СФЭУ традиционные источники выполняют функцию резервных источников, которые включаются в работу при низком уровне потенциала возобновляемых источников [6, 8, 12, 64, 70, 87, 110].

Таким образом, сегодня является актуальным направление применение ВИЭ на территориях Краснодарского края с высоким потенциалом энергии для электроснабжения МФХ. Кроме того, в Краснодарском крае постоянно развиваются различные виды сельскохозяйственной деятельности. В работе был проведён анализ востребованности ВИЭ малой мощности для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ. К таким потребителям относятся потребители, применяемые в пчеловодстве, прудовых хозяйствах, в овцеводческих хозяйствах и в хозяйствах по выращиванию овощей.

Для определения мощности ВИЭ и традиционных источников АСЭ, обеспечивающей энергией МФХ, был проведён анализ мощности и потребляемой энергии хозяйствами, занимающиеся различными видами деятельности.

Пчеловодство. Пчеловодство в России начинает свою историю еще в пятнадцатом веке.

Особое место в пчеловодстве отводится кочевым (перевозным) хозяйствам. Кочевые пасеки отличаются от стационарных тем, что пасека интенсивнее экс-

плуатируется. При этом, используется несколько взятков, хотя бы один из которых находится вдали от постоянного места расположения пасеки. Подобная пасека дает значительно лучшие результаты.

Топливные электростанции не могут использоваться из-за вредных выбросов выхлопных газов и производимого шума. Актуальным является направление применения ВИЭ для электроснабжения потребителей электроэнергии кочевых пасек [115].

В таблице 1.1 приведены параметры электрооборудования кочевых пасек: мощность, время работы и среднесуточное потребление энергии в сезон.

Таблица 1.1 – Параметры основных потребителей электроэнергии пчеловодческого хозяйства на 25-30 ульев

| Описание нагрузки | Мощность, кВт | Среднесуточное время работы, ч | Среднесуточное потребление энергии за сезон, кВт·ч |
|---|---------------|--------------------------------|--|
| Обеспечивающие жизнедеятельность обслуживающего персонала | | | |
| 1. Электроплита | 1,5 | 0,5 | 0,75 |
| 2. Ноутбук, планшет | 0,2 | 3 | 0,6 |
| 3. Освещение | 0,1 | 6 | 0,6 |
| 4. Автохолодильник | 0,2 | 6 | 1,2 |
| 5. Электрочайник | 1,5 | 0,25 | 0,38 |
| 6. Телевизор | 0,1 | 3 | 0,3 |
| 7. Микроволновая печь | 0,8 | 0,2 | 0,16 |
| 8. Кондиционер | 1,0 | 12 | 12 |
| Всего: | | | 16 |
| Технологического процесса | | | |
| 9. Электроинструмент | 0,3 | 0,5 | 0,15 |
| 10. Воскотопка | 0,6 | 3 | 1,8 |
| 11. Медогонка с электроприводом | 0,09 | 3 | 0,27 |
| 12. Электро–наращиватель | 0,06 | 3 | 0,12 |
| 13. Электронож | 0,03 | 3 | 0,03 |
| 14. Распечатыватель вошины | 0,5 | 1 | 0,5 |
| 15. Кремовалка | 0,4 | 2 | 0,8 |
| Всего: | | | 3,7 |
| Всего пчеловодческого хозяйства: | | | 19,9 |

Как видно из таблицы 1.1 основными потребителями электроэнергии пчеловодческого хозяйства является бытовая техника, т. е. потребители, обеспечивающие жизнедеятельность обслуживающего персонала, на их долю приходится из

почти 20 кВт·ч потребляемой энергии хозяйством в сутки более 75 %. Однако в период медосбора, а это от 7 до 15 дней, среднесуточное потребление энергии потребителями, задействованных в технологическом процессе, увеличивается в несколько раз.

Таким образом, можно сделать вывод, что уже в настоящее время энергия солнечного излучения является наиболее приемлемой для использования в автономных системах электроснабжения кочевых пасек и не имеет серьезных альтернатив. Комплексное использование возобновляемых источников энергии солнца и ветра позволит решить проблему с энергообеспечением кочевых пасек и повышением рентабельности производства.

Прудовое хозяйство. Рыбоводство является одним из важных направлений агропромышленного комплекса [9, 17]. В Краснодарском крае широко развито получение товарной продукции при использовании естественных водоемов – прудовыми хозяйствами.

Основную нагрузку на электропотребление составляет домик рыбака, где персонал может жить продолжительное время. Мощности и среднесуточное потребление энергии потребителями, задействованных в технологических процессах прудовых хозяйств приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры потребителей электроэнергии технологических процессов прудового хозяйства

| Потребители электроэнергии | Мощность, кВт | Среднесуточное время работы, ч | Среднесуточное потребление энергии, кВт·ч |
|----------------------------|---------------|--------------------------------|---|
| 1. Электроинструмент | 0,3 | 0,5 | 1,5 |
| 2. Водяной насос | 0,4 | 6 | 2,4 |
| 3. Компрессор | 0,5 | 6 | 3,0 |
| 4. Высоковольтная сетка | 0,2 | 7 | 1,4 |
| 5. Аэрационные установки | 0,7 | 5,0 | 3,5 |
| 6. Освещение | 0,1 | 7 | 0,7 |
| Всего: | | | 12,3 |

Параметры потребителей электроэнергии, обеспечивающих жизнедеятельность обслуживающего персонала, практически совпадают с информацией, при-

ведённой в таблице 1.1. Как видно из таблицы 1.2 среднее суточное потребление электроэнергии составляет 12,3 кВт·ч.

Овцеводство – одна из важнейших отраслей животноводства, занимающаяся разведением овец [17]. Чаще всего встречается летний выпас овец на лугах высоко в горах. Поэтому, альтернативная энергетика для этого вида МФХ является востребованной. Анализ показал, что в кочующем овцеводстве значительно меньше потребителей электроэнергии, обеспечивающих жизнедеятельность пастухов и, применяемых в технологических процессах. В технологических процессах применяются машинки для стрижки, электропастухи и системы идентификации животных. Среднесуточное потребление энергии этих потребителей за сезон, с учётом коротких периодов интенсивного использования машинок для стрижки, мощность которых составляет 400–600 Вт, не превышает 3 кВт·ч в сутки (с расчёта на 100 голов). Однако период стрижки овец может занимать время от одной недели, поэтому в это время расход энергии увеличивается в несколько раз.

Выращивание овощей в поле. Электротехнологии выращивания овощей в поле значительно менее затратные, чем в теплицах. Основные энергозатраты при выращивании овощей в поле приходятся на обеспечение жизнедеятельности полеводов и сторожей, которые проживают и отдыхают в доме полевода. Перечень потребителей и их энергозатраты дома полевода практически соответствует перечню потребителей и энергозатратам домику пчеловеда (таблица 1.1).

Анализ энергопотребления МФХ в полевых условиях показал, что среднесуточное значение не превышает 25 кВт·ч. Однако, многие работы, связанные с использованием электроинструмента, производятся крайне редко, поэтому энергопотребление может быть ниже. Что важно, основное энергопотребление потребителями МФХ происходит в дневное время, когда потенциал солнечной энергии имеет самый высокий уровень.

Таким образом, актуальным сегодня является направление применения в составе АСЭ, предназначенных для электроснабжения потребителей электроэнергии МФХ, ветро-солнечных электростанций. Что кроме повышения энергоэффек-

тивности таких систем позволит повысить уровень рентабельности сельскохозяйственного производства.

1.2 Конструктивные решения и особенности работы мобильных электростанций на возобновляемых источниках

Сегодня известны конструктивные решения мобильных ветро-солнечных электростанций (МВСЭ). В России разрабатываются ООО АльтЭнергия МВСЭ (модель МС). В таблице 1.3 приведены энергетические параметры этих станций [52, 57, 115].

Таблица 1.3 – Энергетические параметры МВСЭ модели МС

| Наименование параметров | МС3-12 | МС4-24 | МС6-24 | МС12-24 |
|--|---------|------------|-----------|-----------|
| 1. Номинальная мощность, кВт | 3 | 4 | 6 | 12 |
| 2. Пиковая мощность, кВт | 3,5 | 4,7 | 7 | 14 |
| 3. Номинальная мощность СФЭУ, кВт | 1,4–1,7 | 1,4–1,7 | 1,2–2,0 | 2,0–2,7 |
| 4. Выходное напряжение постоянного тока, В | 12, 24 | 12, 24, 48 | 24, 48 | 24, 48 |
| 5. Номинальная мощность ВЭУ, Вт | 400–600 | 400–800 | 800–900 | 800–1000 |
| 6. Ёмкость АБ, А·ч | 600–800 | 800–1000 | 1000–1200 | 1000–1200 |
| 7. Максимальный зарядный ток АБ, А | 30 | 40 | 60 | 70 |
| 8. Номинальная мощность ДЭС, кВт | 1,2 | 2,0 | 2,0–3,0 | 3,0–5,0 |

МВСЭ модели МС (рисунок 1.1) генерируют напряжение переменного и постоянного тока. Однофазное синусоидальное напряжение 220 В частотой 50 Гц и напряжение постоянного тока от 12 до 48 В [52, 73, 115].

Все модели укомплектованы дизельными электростанциями (ДЭС) запуск которых может осуществляться в ручном режиме и автоматически.

На долю ВИЭ приходится не более 60 % вырабатываемой электроэнергии МВСЭ, если её мощность 3 кВт, и не более 30 %, если её мощность 12 кВт.

В составе станции применяются контроллер SunWize с номинальным напряжением 24 В и током от 60 А.



Рисунок 1.1 – Внешний вид МВСЭ модели МС

На автоприцепе может устанавливаться 1 или 2 горизонтально-осевых ВЭУ мощностью 400–600 Вт с напряжением 24 В. АБ CSB (DJM) емкость одной батареи 150 А·ч в комплекте от 6 шт. Автономная работа станции только от АБ при нагрузке 4,5 кВт в непрерывном режиме составляет около 2,3 ч.

Автоприцепы Курганские грузоподъемностью от 550 до 585 кг в зависимости от габаритов кузова и стоимостью 44 – 54 тыс. руб.

В походном положении ВЭУ и СБ складываются домиком (4 секции по 2 с каждой стороны в целях облегчения манипуляции и транспортировки одним человеком).

Цена мобильной станции в зависимости от мощности и комплектации находится в пределах от 400 до 1500 тыс. руб, масса с автоприцепом также изменяется в пределах от 300 до 600 кг.

В г. Новочеркасске (компания «Хевел») находится завод полного цикла, начиная от создания солнечных модулей и до отгрузки готовых МВСЭ (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Внешний вид MBCЭ серии АГЭУ-М компании «Хевел»

Мобильные станции предназначены для применения в полевых условиях и монтируется на базовом полуприцепе. Комплектуется 6 солнечными батареями общей мощностью 2 кВт. Аккумуляторные батареи, ёмкостью 150 А·ч каждая, обеспечивают запас электроэнергии 1,2 кВт·ч [74, 115]. Стоимость при комплектации с ДЭС превышает 1300 тыс. руб.

Особенностью работы MBCЭ является то, что ВЭУ генерирует напряжение постоянного тока и её энергия, как и энергия СФЭУ накапливается в аккумуляторных батареях (АБ), после чего преобразуется солнечным инвертором в напряжение переменного тока. Одним из основных недостатков, рассмотренных MBCЭ является то, что основным производителем энергии является ДЭС и являются источником питания для однофазных потребителей переменного тока. Кроме того, сегодня компания «Хевел» не выпускает MBCЭ.

На рисунке 1.3 приведены западные аналоги мобильных станций MOBISUN PLUS, которые применяются для заряда АБ электроинструмента, беспилотных летательных аппаратов и питания осветительной нагрузки.



Рисунок 1.3 – Мобильные электростанции серии MOBISUN PLUS

Мощность СФЭУ составляет до 2 кВт. Эти станции являются только источниками напряжения постоянного тока [75, 115]. Алгоритм энергоэффективной работы МВСЭ имеет следующую последовательность. Основными источниками электроэнергии при достаточном уровне солнечной радиации и скорости ветра являются СФЭУ и ВЭУ. В пасмурную погоду, в ночное время или при низких скоростях ветра энергию в работу включается ДЭС или бензоэлектростанция (БЭС). При дополнительной востребованности энергии система управления подключает аккумуляторные батареи (АБ), которые заряжались в основном режиме работы от СФЭУ и ВЭУ.

Для улучшения эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) МВСЭ целесообразно в их конструкции использовать новую элементную базу, включая статические преобразователи и стабилизаторы параметров электроэнергии [76, 114]. Кроме того, для улучшения ЭТХ мобильных станций целесообразно в их конструкции применять роторные (с вертикально-осевые) ВЭУ. Виды механизмов ВЭУ с вертикальной осью вращения приведены на рисунке 1.4 [86, 115]: ортогональная конструкция; механизм Дарье; механизм Савониуса; конструкция на многолопастном роторе с направляющим аппаратом; генератор с геликоидной конструкцией.



Рисунок 1.4 – Конструкции ВЭУ с вертикальной осью

Преимущества ветроколес вертикального типа, прежде всего, связаны с тем, что генераторы таких ВЭУ генерируют электроэнергию уже при скоростях от 2 м/с (ВЭУ горизонтального типа от 3 м/с), при этом, не зависимо от направления ветровых потоков [50, 52, 55, 65]. Таким образом, применение МВСЭ в сельскохозяйственном производстве является перспективным направлением, позволяющим повысить производительность сельскохозяйственного производства. Однако для разработки энергоэффективных МВСЭ необходимо разработать математический аппарат, включающий методики расчёта, оптимизации и математического моделирования, позволяющий проектировать энергоэффективные мобильные автономные источники электроэнергии, выполненные на базе СФЭУ и ВЭУ.

1.3 Варианты построения мобильных электростанций на возобновляемых источниках и основные характеристики их функциональных элементов

Обобщая результаты научных исследований в ряде работ [18, 21, 43, 50,

74–76, 120, 121, 124], выделяются три основных варианта построения АСЭ, имеющих в своём составе ВИЭ:

1) схема, выполненная на базе солнечных батарей (СБ), где в качестве накопителей электроэнергии применяются АБ;

2) в составе системы кроме СБ и АБ применяются топливные генераторы (дизельные или бензоэлектростанции);

3) ветро-дизельные электростанции, где также в качестве накопителя электроэнергии применяются АБ.

Схемы АСЭ не содержащие ДЭС выполняются небольшой мощности, как правило, до 0,5 кВт. В случаях с применением ДЭС диапазон мощностей может составлять от единиц до десятков кВт.

На рисунках 1.5–1.8 приведены структурные схемы известных технических решений мобильных электростанций, выполненных с использованием ДЭС. В составе рассмотренных структур АСЭ вместо ДЭС могут применяться бензоэлектростанции (БЭС).

Вариант АСЭ, выполненный на базе дизельной электростанции (ДЭС) и ВИЭ (может применяться ВЭУ или СФЭУ) приведён на рисунке 1.5. Каждый из источников покрывает определенные временные интервалы потребности электроэнергии. По условиям устойчивости системы электроснабжения, определяемым соотношением мощностей ДЭС и ВИЭ, мощность последних не должна превышать 50 % от мощности ДЭС.

Применение в составе АСЭ ВИЭ позволяет экономить дизельное топливо и увеличить ресурс работы ДЭС [8, 17]. Кроме того, достоинством, рассмотренной АСЭ (рисунок 1.5) является её конструктивная простота, позволяющая снизить требования к системе управления и свести к минимуму состав оборудования. А основной недостаток связан с относительно небольшим временем работы ВИЭ.

Отличительной особенностью схемы, приведённой на рисунке 1.6, является то, что в составе схемы применяются аккумуляторные батареи (АБ) [14, 28]. В период высокого уровня потенциала ВИЭ дизельная станция ДЭС отключена.

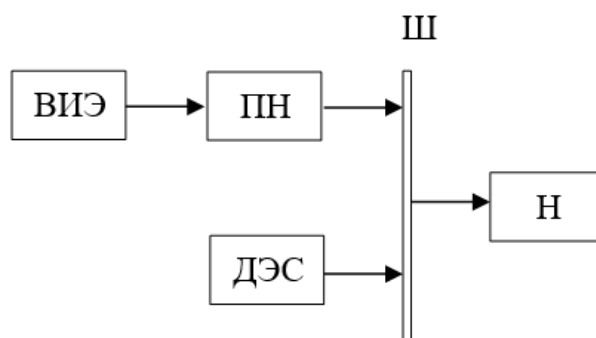


Рисунок 1.5 – Структурная схема АСЭ с постоянно работающей ДЭС:
ПН – преобразователь напряжения; Н – нагрузка; Ш – шина переменного тока

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

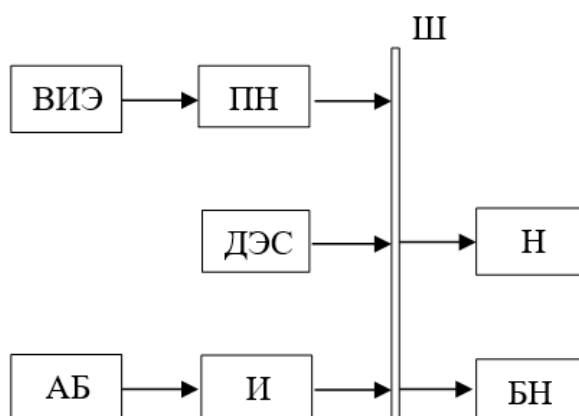


Рисунок 1.6 – Структурная схема АСЭ с АБ: И – инвертор напряжения

В зависимости от соотношения мощности ДЭС и мощности ВИЭ, как правило, 50 на 50 %, для схемы, приведённой на рисунке 1.6, предусматривается раздельная работа ДЭС и ВИЭ, а также их параллельная работа на общую нагрузку.

В режиме раздельной работы преобразователи напряжения ПН имеют относительно большую установленную мощность. Мощность ВИЭ существенно превышает мощность нагрузки Н. В этом случае избыточную электроэнергию потребляет балластная нагрузка БН (рисунок 1.6). В качестве балластной нагрузки, как правило, используются водяные обогреватели, осветительная нагрузка и т. п.,

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

На рисунке 1.7 приведена схема АСЭ, выполненная с инверторной ДЭС [13, 14].

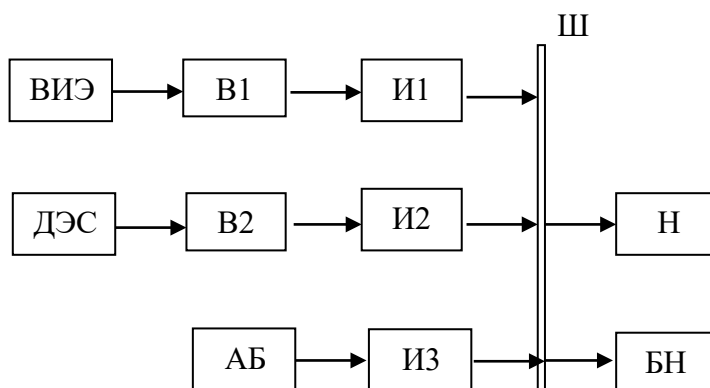


Рисунок 1.7 – Структурная схема АСЭ с инверторной ДЭС

Преимуществом схемы является то, что, сокращается расход топлива в режимах малых нагрузок за счет снижения частоты вращения вала дизельной станции. В схеме применяется выпрямитель В1, когда в качестве источника питания используется ВЭУ, генерирующая переменный ток. Недостаток схемы – большое количество преобразователей электроэнергии.

На рисунке 1.8 приведена структурная схема АСЭ, содержащая шину постоянного тока Ш1 и шину переменного тока Ш2, к которым подключается соответственно нагрузка постоянного тока Н1 и переменного тока Н2 [14].

Если в качестве ВИЭ применяется СФЭУ, то из схемы на рисунке 1.9 исключается выпрямитель В1. Если в качестве ВИЭ в составе схемы применяются ВЭУ и СФЭУ, то они подключаются к шине Ш1, если ВЭУ генерирует переменный ток, она может подключаться к шине Ш2.

Шина постоянного тока (рисунок 1.8), позволяет объединить источники электроэнергии с разным родом и частотой тока. Шина переменного тока имеет преимущества, когда система имеет распределенную генерацию, имеющей место при интеграции АСЭ в существующие системы электроснабжения.

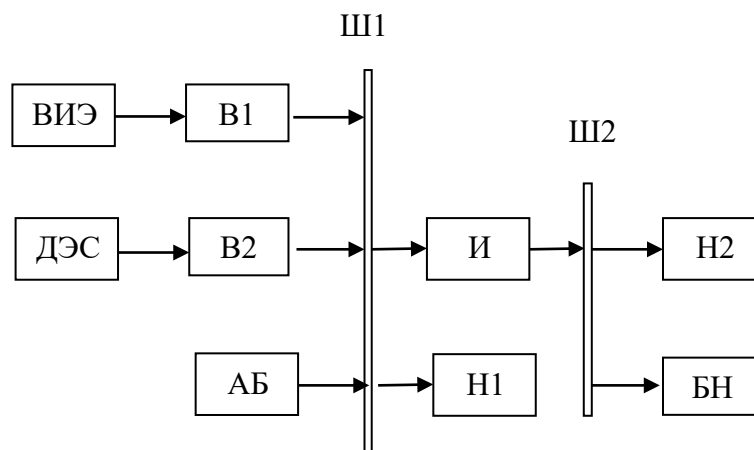


Рисунок 1.8 – Структурная схема АСЭ с шиной постоянного и переменного тока

Общий недостаток рассмотренных структурных схем АСЭ, выполненных на ВИЭ являются относительно низкие эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ) [76]. Одним из важных элементов АСЭ, выполненных с использованием ВИЭ является инвертор, предназначенный для преобразования напряжения постоянного тока, генерируемого ветроустановкой постоянного тока, солнечными или аккумуляторными батареями в напряжение переменного тока.

На рисунке 1.9 приведена типовая структурная схема автономного инвертора, где обозначено: $\Phi_{ВХ}$ и $\Phi_{ВЫХ}$ – входной и выходной фильтры; ЭСП – электронная схема преобразования; Т – трансформатор, предназначен для согласования напряжения источника питания с нагрузкой; СУ – система управления. Принцип работы современных схем инвертора основан на ШИМ выходного напряжения [71, 72, 84, 103, 110].

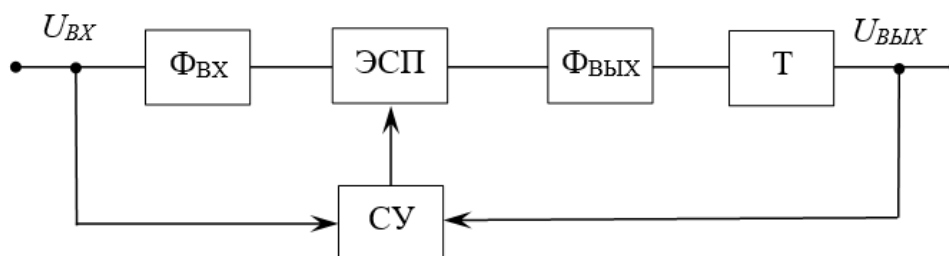


Рисунок 1.9 – Структурная схема автономного инвертора

В общем случае структура и алгоритм работы системы управления СУ инвертора зависит от типа силовых электронных приборов, применяемых в составе ЭСП (тиристоры, симисторы или транзисторы).

От эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) инверторов напряжения зависят показатели надёжности и качества электроэнергии автономных энергетических систем. Коэффициент полезного действия, современных однофазных инверторов с промежуточным высокочастотным преобразованием в зависимости от мощности, качества выходного напряжения изменяется от 90 до 95 %. Масса инверторов напряжения не оказывает особого влияния на массогабаритные показатели АСЭ [115].

Для улучшения ЭТХ и технико-экономических показателей инверторов напряжения, применяемых в составе АСЭ, целесообразно провести анализ конструктивных решений, особенностей работы и характеристик, известных их структурно-схемных решений, рассмотреть преимущества и недостатки. Далее на основе этого анализа, с учётом новых разработок элементной базы преобразователей постоянного ток в переменный, разработать энергоэффективную схему автономного инвертора для АСЭ.

Сегодня в инверторах напряжения широко применяется, промежуточное высокочастотное преобразование электроэнергии, что позволяет значительно улучшить их массогабаритные показатели, за счёт уменьшения массы трансформатора и реактивных элементов. Как правило, инверторы с высокочастотным преобразованием имеют мощность до 5 кВт, а высокая частота преобразования может изменяться от килогерц до нескольких десятков килогерц [44, 76]. На рисунке 1.10 приведена обобщённая структурная схема инвертора напряжения с разными вариантами реализации устройств, понижающих высокую частоту преобразования до уровня промышленной, с применением: неуправляемых выпрямителей В и дополнительной электронной схемы преобразования ЭСП2, а также, выполненная на базе непосредственного преобразователя частоты НПЧ.

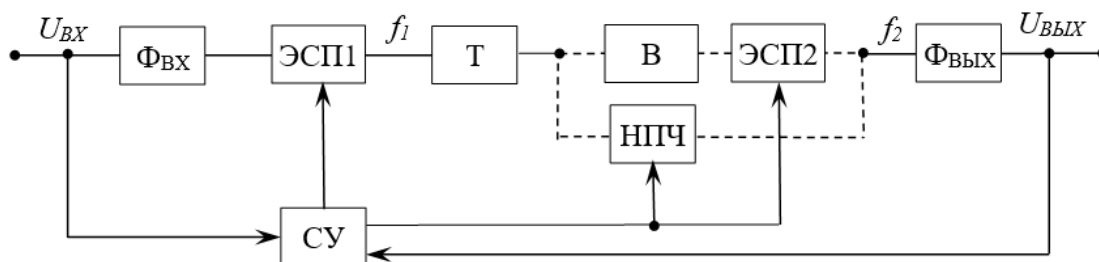


Рисунок 1.10 – Структурная схема автономного инвертора с промежуточным высокочастотным звеном

Рассмотренные варианты, реализации понижения высокой частоты до уровня промышленной, понижают показатели надёжности и КПД преобразователя напряжения постоянного тока в переменный, из-за повышенного количества силовых электронных приборов в схеме преобразователя [43, 49, 51].

Сегодня широко применяются в основном два структурно-схемных решения ЭСП однофазных инверторов: мостовая схема, выполненная на 4-х электронных приборах и полумостовая схема на трансформаторе со средней точкой, выполненная на двух электронных приборах (рисунок 1.11). От автономных инверторов зависят не только показатели надёжности работы АСЭ, но и качество электроэнергии переменного тока. При этом, чем выше требования к качеству электроэнергии, тем выше стоимость преобразователя и больше его масса [14, 17].

Принцип работы эксплуатируемых в настоящее время инверторов напряжения, применяемых в составе АСЭ, выполненных на ВИЭ, основан на высокочастотном преобразовании напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения [15, 17, 39, 117, 127]. При этом, они имеют следующие недостатки: небольшой диапазон стабилизации напряжения, не позволяющий системе управления преобразователем поддерживать требуемый уровень напряжения при резкопеременном (скачкообразном) характере нагрузки, что характерно для сельскохозяйственных потребителей электроэнергии; относительно низкое качество выходного напряжения, что не соответствует требованиям некоторого оборудования фермеров.

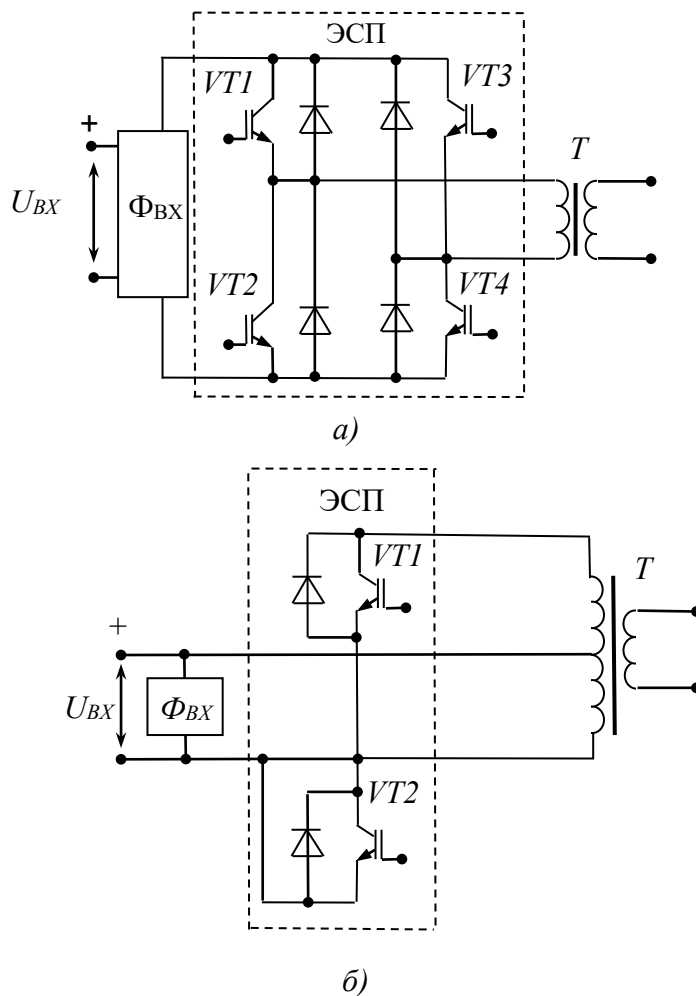


Рисунок 1.11 – Функциональные схемы однофазных инверторов:
 а – мостовая схема; б – полумостовая схема [14, 17]

Улучшить ЭТХ автономных систем электроснабжения можно, если учесть недостатки и достоинства эксплуатируемых систем, а также применить в составе системы новые функциональные элементы с улучшенными технико-экономическими показателями.

Таким образом, целесообразно рассмотреть эксплуатационно-технические характеристики основных функциональных элементов, применяемых в составе АСЭ, выполненных на ВИЭ.

В настоящее время широкое распространение получили вертикально-осевые) роторные ВЭУ не большой мощности, как правило, мощностью до 3 кВт. Величина мощности, которая является актуальной для применения в автономных системах электроснабжения МФХ.

Роторные в сравнении с горизонтально-осевыми ВЭУ имеют следующие особенности работы [103, 125, 131]:

- нет необходимости их ориентировать в направлении ветра, поскольку ветровой поток, движущийся с любой стороны, одинаково воздействует на лопасти;
- воздушные потоки одновременно воздействуют на рабочую и на обратную стороны лопастей, что несколько снижает эффективность выработки энергии, т. е. роторные ВЭУ имеют на незначительную величину ниже КПД;
- если вертикально-осевые ВЭУ генерируют электроэнергию при скоростях ветра от 3 м/с, то роторные ВЭУ генерируют электроэнергию уже при скоростях ветра от 2 м/с.

В качестве генераторов электроэнергии в составе ВЭУ двух типов сегодня применяются бесконтактные синхронные генераторы с возбуждением от постоянных (редкоземельных) магнитов. Выходное напряжение ВЭУ постоянного тока, поскольку генератор установки к контроллеру подключается через выпрямитель. Диапазон изменения номинального напряжения ВЭУ небольшой мощности (до 1000 Вт) в основном от 12 до 48 В.

Стоимость роторных ВЭУ примерно в 1,4–1,5 раз больше стоимости горизонтально-осевых ВЭУ и при мощности 300–500 Вт составляет 50–80 тыс. руб. Такой диапазон стоимости усложняет выбор установки для рационального построения структуры мобильной станции.

Основными характеристиками солнечных батарей (СБ) являются:

1) номинальная мощность эта мощность определяется исходя из освещённости 1000 Вт/м^2 , при этом, на практике СБ мощностью 100 Вт при прямом солнечном излучении в ясную погоду, вырабатывает мощность 60–80 Вт, при лёгкой облачности – 30–50 Вт, а при полной облачности не более 25 Вт;

2) номинальное напряжение, как правило, 12 или 24 В, при этом на холостом ходу на выводах СБ напряжение равно 19 или 38 В соответственно.

Конструктивно СБ могут быть односторонними или двухсторонними. Двухсторонние вырабатывают больше электроэнергии, но и они дороже практически в 1,5–2 раза.

Стоимость СБ площадью 1 м² находится в пределах 9–14 тыс. руб. Стоимость современных гибридных монопанелей мощностью 500 Вт и площадью 2 м² составляет около 18 тыс. руб. Такой разброс цен СБ затрудняет разработку оптимальной структуры мобильной станции.

Мощность СБ и их КПД зависят только от уровня солнечной радиации, поскольку в зимнее время длительность светового дня короче, то и количество вырабатываемой электроэнергии ниже чем в летний период.

Если к СБ через инвертор подключить мощные потребители электроэнергии в дневное время при самом высоком уровне солнечной радиации, то, по сравнению с вечерним и утренним временем, а также пасмурным днём, электроэнергию можно экономить по следующим причинам:

– когда АБ заряжена более чем на 70 %, то контроллер заряда ограничивает ток заряда батареи и если включить в это время мощные потребители электроэнергии, то будет использоваться вся генерируемая энергия СБ;

– ток течёт от СБ минуя АБ к потребителям электроэнергии, следовательно, отсутствуют потери, которые возникают при заряде батареи;

– когда мощности СБ в дневное время недостаточно для нагрузки и недостаток восполняется АБ, то ток разряда батареи будет меньшим, чем если бы эти потребители включились в вечернее время. Известно, что при меньшем токе разряда, более длительное время разряда АБ, чем при большем токе разряда, и уменьшаются потери в батарее.

Основными характеристиками АБ являются:

1) тип батареи:

– кислотно–свинцовые АБ, которые работают в режиме глубокого разряда и недозаряда;

– АБ технологии AGM (герметизированные АБ) не требуют обслуживания и имеют низкий уровень саморазряда, однако не допускают перегрев и перезаряд, поскольку это приводит к сокращению срока службы;

– AGM – аккумуляторные батареи общего назначения работают в буферном режиме, при этом они большую часть времени находятся в заряженном состоянии и не допускают разряд более 30 %;

– гелевые АБ, также герметизированные лучше переносят глубокий разряд в сравнении с АБ по AGM технологиям, не критичны требования к перезаряду, при этом, срок их службы – 10–15 лет;

– OPzS – АБ трубчатые в них применяется жидкий электролит, работают в тяжёлых режимах эксплуатации, и имеют срок службы – 15–20 лет.

– щелочные АБ никель–кадмиевые и никель–железные практически совсем не боятся глубокого разряда их срок службы составляет около 20 лет, однако они требуют тщательного обслуживания являются экологически вредными в сравнении с другими типами АБ, а также имеет низкий КПД 50–60 %, при этом КПД кислотных АБ составляет 70–85 %;

2) номинальное напряжение, как правило, 12 В;

3) ёмкость батареи.

Важная особенность АЮ: при больших разрядных токах имеют ёмкость меньше, а при не больших токах разряда – больше. Так, к примеру, АБ ёмкостью 60 А·ч при токе разряда 15 А разрядится быстрее, чем за 4 часа, а при токе в 1 А будет разряжаться дольше, чем 60 ч.

Ёмкость практических АБ всех типов зависит от температуры, поэтому оптимальный режим их работы находится при температуре от 0 до +30° С. При выборе АБ необходимо учитывать, что в течение срока службы ёмкость их снижается, и что от качества эксплуатации батарей зависит их срок службы.

Основное требование ко всем кислотно–свинцовых АБ: они должны быть всегда максимально заряженными и не должны длительное время быть в недозаряженном состоянии и вообще быть разряженными.

Напряжение заряда АБ не должно превышать 14,4 В. Как правило, заряд АБ длится 12–14 часов.

Стоимостью современных кислотно-свинцовых АБ емкостью 100 и 200 А·ч в среднем составляет 15–25 и 45–50 тыс. руб соответственно. Цены аккумулято-

ров имеют еще больший разброс ценовой политики, что не дает также возможность провести расчет и выбор элементов для формирования рациональной структуры мобильной энергетической системы.

Основная функция контроллера осуществлять контроль за параметрами АБ в период заряда и разряда АБ, отключать источник электроэнергии при полном заряде батареи и потребители электроэнергии при полном разряде.

Современные контроллеры выполняют следующие функции и параметры:

1) номинальное напряжение, соответствующее значению напряжения автономной системы;

2) максимальный ток заряда АБ, который не должен превышать максимальный ток, вырабатываемый солнечными батареями;

3) максимальный ток в нагрузке;

4) алгоритм заряда:

– простые контроллеры отключают заряд АБ при напряжении, как правило, равным 14.4 В;

– контроллеры с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) при достижении значения напряжения 14.4 В продолжают заряжать АБ, но снижают при этом зарядный ток, за счёт чего АБ заряжается на 100 %;

– ТММ-контроллеры, наряду с ШИМ контролируют значение точки максимальной мощности СБ это позволяет при низком уровне солнечной радиации, в том числе в пасмурную погоду, увеличивать выработку на 20–30 %, однако они имеют высокую стоимость;

5) функция выравнивания применяется АБ с жидким электролитом. Контроллер периодически заряжает АБ повышенным напряжением (около 15 В), что способствует восстановлению ёмкости АБ. Для герметичных АБ этот режим не применяется;

6) контроллеры отключают АБ при значениях напряжения 11,0–11,5 В, что, как правило, соответствует глубине разряда примерно 60–80 %.

7) определение уровня заряда АБ и его индикация. Такие контроллеры содержат память, где храниться информация о полученных/потраченных ампер–

часах, ватт-часах, а также ёмкость батареи. Как правило, они имеют интерфейс для подключения к компьютеру.

Важно, что контроллеры, работающие с кислотными АБ не подходят для щелочных АБ.

Стоимость ТММ-контроллера с максимальным током от 10 до 20 А составляет 4,5–5,5 и 9–10 тыс. руб соответственно.

Основные характеристики инверторов:

- 1) входное напряжение постоянного тока, как правило, равно 12 или 24 В;
- 2) выходное напряжение переменного тока для однофазных инверторов 220–240 В, а трёхфазных – 380–400 В;
- 3) номинальная мощность зависит от мощности потребителей, работающих одновременно;
- 4) пиковая мощность – мощность, как правило, превышающая в 3 раза номинальную мощность инвертора, которую он удерживает в течение нескольких секунд;
- 5) качество выходного напряжения, которое может быть синусоидальной или квазисинусоидальной формы (прямоугольной или трапециидальной). Здесь важный факт: стоимость инверторов с синусоидальной формой выходного напряжения в 2–3 раза больше стоимости инверторов с квазисинусоидальным выходным напряжением.

КПД инверторов с квазисинусоидальным напряжением больше, чем у инверторов с синусоидальным сигналом, а ток на холостом ходу меньше.

Важными характеристиками инверторов является наличие входа 220 В и возможность работы в качестве стабилизатора и/или зарядного устройства, «Спящего» режима, при котором при отключении нагрузки инвертор не работает, а также сигнализации о состоянии (включенном или выключенном), о заряде или разряде АБ и т. п.

Сегодня широко применяются гибридные инверторы, которые могут работать параллельно с источником переменного тока, одновременно питая нагрузку от АБ.

Стоимость инверторов мощностью 5 кВт с квазисинусоидальным напряжением находится в пределах 12–20 тыс. руб, а современных гибридных инверторов с синусоидальным выходным напряжением 35–47 тыс. руб.

Резервные жидкотопливные электростанции бензо- (БЭС) и дизельные (ДЭС), как правило, применяются, когда необходимо периодически работать с электродвигательной нагрузкой (электрорежущий и электросверлильный инструмент, погружные насосы и т. п.).

Основными характеристиками БЭС и ДЭС являются номинальная мощность и номинальное напряжение, расход топлива и ресурс работы.

В общем случае выбор между БЭС и ДЭС зависит от потребляемой мощности, условий эксплуатации и режима работы.

БЭС, используемая для резервного электроснабжения, мощностью 2–3 кВт рассчитана, как правило, на кратковременное использование (не более 5 ч). У большинства современных БЭС российского и китайского производства мощностью 2–3 кВт моторесурс составляет 3500–4000 ч, расход топлива 1,2–3 л/ч, стоимость находится в пределах 25–35 тыс. руб.

Современные ДЭС мощностью 3 кВт имеют моторесурс при их использовании для резервного электроснабжения 12000 – 15000 ч, расход топлива 0,3 л/ч, при этом их стоимость составляет 60–70 тыс. руб.

Кроме того, целесообразно рассмотреть преимущества и недостатки БЭС и ДЭС.

Основными преимуществами БЭС являются: доступная цена; компактный размер; небольшой вес; лёгкий запуск при температуре до -20°C . Недостатки БЭС: небольшая производительность; уровень шума более 80 дБА; невозможность длительное время работать без перерыва.

Основные преимущества ДЭС: большой моторесурс; длительная непрерывная работа; на 30 % ниже расход топлива, чем у БЭС. Недостатки ДЭС: относительно большие габариты и вес; при эксплуатации на холостых оборотах происходит интенсивный износ; для запуска в холодную погоду необходимо зимнее топливо со специальными присадками.

Таким образом, электроснабжение автономных сельскохозяйственных потребителей электроэнергии МФХ имеет особенности, связанные с их небольшой мощностью и не постоянством работы, разбросом на большой территории при удалении от внешней энергетической системы, в связи с чем, к ним предъявляются следующие требования:

1) мобильность, т. е. способность в течение сезона перемещаться для обеспечения электроэнергией потребителей МФХ, занимающихся разным видом деятельности;

2) обеспечивать электроэнергией автономных потребителей во время пиковой нагрузки в период медосбора, стрижки овец, уборки урожая и т. п.;

3) высокий уровень экологичности производства электроэнергии – минимизация загрязнения окружающей среды при минимизации времени работы топливных источников энергии или исключения их из состава мобильной электростанции;

4) иметь улучшенные массогабаритные и технико-экономические показатели.

1.4 Энергетические и экономические показатели ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установок

Одним из важных вопросов оценки эффективности МВСЭ является определение их энергетических показателей. Основными функциональными элементами этих станций являются солнечные батареи (СБ) СФЭУ, ВЭУ, автономный инвертор (АИ), аккумуляторные батареи (АБ) и контроллер. Известно, что из всех источников энергии ВЭУ являются более производительными, но они имеют меньший срок службы и ниже надежность работы в сравнении с СФЭУ, кроме того, они требуют постоянного обслуживания и ремонта. Производители современных СФЭУ гарантируют безотказную работу СБ до 25 лет и более [16, 40, 103].

Для построения энергоэффективной гибридной АСЭ, которой является МВСЭ, проводится расчет основных энергетических показателей системы. Расчет начинается с определения энергетических показателей потребителей электроэнергии.

Энергия, потребляемая нагрузкой за период (день, неделя, месяц, сезон и т. д.) определяется по формуле [63, 66]:

$$W = 1,2 \sum_{i=1}^n P_i t_i, \quad (1.1)$$

где 1,2 – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии в системе электрообеспечения;

P_i – мощность, i -го работающего потребителя электроэнергии, Вт;

t – время работы потребителя, ч;

n – всего потребителей, работающих одновременно, шт.;

Технический потенциал ветровой энергетики [5]:

$$W_T = 0,01 \frac{N_C}{D^2} T S, \quad (1.2)$$

где N_C – среднее арифметическое значение механической мощности ВЭУ, которое определяется по формуле [14]:

$$N_C = \frac{\pi D^2}{8} \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 \eta_{ВЭУ} t_i, \quad (1.3)$$

где $\eta_{ВЭУ}$ – общий КПД ВЭУ, который определяется по формуле [14]:

$$\eta_{ВЭУ} = c_p \eta_{мех} \eta_{эл}, \quad (1.4)$$

где c_p – коэффициент использования ветра;

$\eta_{мех}$ – механический КПД ВЭУ, о.е.;

$\eta_{эл}$ – электрический КПД ВЭУ, о.е.

Таким образом, технический потенциал ветровой энергетики зависит только от средней скорости ветра и диаметра ветроколеса ВЭУ.

В малой энергетике сегодня применяются два типа ВЭУ вертикально-осевые и горизонтально-осевые установки [32]. Мощность горизонтально-осевых ВЭУ определяется формуле:

$$P_{ВЭУ} = \frac{\pi v^3}{8h^3} \rho \xi \eta_{CV} N_C D^2 h^3, \quad (1.5)$$

где h – высота установки, м;

D – диаметр ветроколеса, м;

$\xi = 0,5-0,59$ – коэффициент использования энергии ветра;

η_{CV} – КПД сопутствующих устройств, о.е.

Мощность вертикально-осевых ВЭУ определяется формуле [11]:

$$P_{ВЭУ} = \frac{v^3}{2h^3} \rho \xi \eta_{CV} \left(DH \left(h + \frac{H}{2} \right) \right)^3, \quad (1.6)$$

где H – высота ветроколеса (роторного типа), м.

Технический уровень солнечной радиации соответствует выражению [14]:

$$E \geq 0,2 \text{ кВт} \cdot \text{м} / \text{м}^2. \quad (1.7)$$

На практике для определения мощности солнечных батарей рассчитывают общее количество электроэнергии, которое может выработать станция за расчетный промежуток времени. Полученное значение солнечной радиации делится на 1000, получается количество пиков часов – условное время, в течение которого солнце светит как бы с интенсивностью $1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Солнечный модуль мощностью P_M в течение выбранного периода вырабатывает энергию [14, 43]:

$$W_M = \frac{k P_M E}{1000}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (1.8)$$

где E – значение инсоляции за выбранный период, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$;

k – поправочный коэффициент, учитывающий потери мощности солнечных модулей при нагреве и постоянно изменяющийся угол падения лучей на поверхность фотоэлементов.

На основе данных о солнечной радиации для каждого сезона можно рассчитать номинальную мощность СБ [14]:

$$P_H = \frac{W}{k_{CB} k_A W_M}, \quad (1.9)$$

где W – средний дневной расход энергии, кВт·ч;

k_{CB} и k_A – поправочные коэффициенты.

Примерное значение поправочного коэффициента $k_{CB} = 0,6$ летом, 1,2 зимой и 0,9 весной и осенью. Значение поправочного коэффициента k_A зависит от положения солнечных модулей относительно направления солнечной радиации. Для марта и ноября $k_A = 0,85$, для лета – 1, ... 0, а для зимы равен 0,75. Если угол наклона постоянно ориентируется относительно солнечной радиации, то $k_A = 1$ в течение года.

В общем случае расчет количества СБ проводится с учётом, вырабатываемой ими мощности, как правило, для современных батарей это 150 – 200 Вт/м².

Мощность инвертора напряжения, применяемых в составе солнечных электростанций [17]:

$$P_{II} = 1,1 P_{ПИК}. \quad (1.10)$$

Номинальная мощность СБ батарей при известном суточном потреблении энергии определяется по формуле [14]:

$$P_H = \frac{W_{\sum_{сут}}}{k_{CB} k_A H_{CP}}, \quad (1.11)$$

где H_{CP} – средняя дневная радиация для солнечной панели, расположенной под оптимальным углом.

В общем случае КПД солнечной батареи (СБ) определяется по формуле [5, 48]:

$$\eta_{CB} = \frac{P_{max}}{SI_{СИ}}, \quad (1.12)$$

где P_{max} – максимальная мощность, в соответствии с паспортными данными для конкретной серии солнечных панелей, Вт;

S – площадь солнечных фотоэлементов, м²;

$I_{СИ}$ – интенсивность солнечного излучения, Вт/м².

При расчётах, как правило, интенсивность солнечного излучения принимают, как среднюю величину равную 635 Вт/м². В Краснодарском крае в ясный солнечный день эта величина находится в пределах от 950 до 1200 Вт/м².

Ёмкость АБ определяют по величине тока разряда I_{PA3} (А) и времени разряда t (ч) [17]:

$$C = I_{PA3} t, \text{ А}\cdot\text{ч.} \quad (1.13)$$

Ёмкость АБ, применяемых в составе АСЭ можно в несколько раз уменьшить, если в составе автономной станции применяются дополнительные источники электроэнергии ВЭУ и (или) бензоэлектростанция.

Для производства электроэнергии переменного тока, кроме фотоэлектрических преобразователей (СБ), автономных инверторов (АИ) и аккумуляторных батарей (АБ) в составе СФЭУ применяются контроллер и другие согласующие, в том числе коммутационные устройства. В проектирование станции, как известно, включается стоимость проектных и строительных работ.

Средняя удельная стоимость фотоэлектрических модулей в настоящее время составляет 100–150 руб/Вт [1, 9, 17].

Общие капиталовложения в ВИЭ [115]:

$$K = K_{УСТ} + K_{ПР} + K_{СТР}, \quad (1.14)$$

где $K_{УСТ}$ – установленная стоимость оборудования, руб;

$K_{ПР}$ – стоимость проектных работ по определению места установки на местности, руб;

$K_{СТР}$ – стоимость строительных и монтажных работ по установке электростанции, руб.

Общие годовые эксплуатационные расходы [115]:

$$\mathcal{E} = C_{ЭКС} + C_{РЕМ}, \quad (1.15)$$

где $C_{ЭКС}$ – годовые расходы на эксплуатацию системы электроснабжения, руб;

$C_{РЕМ}$ – годовые расходы на плановый ремонт, руб.

Срок окупаемости ВИЭ [14]:

$$T_{OK} = \frac{P_{ВИЭ}C}{TK_{и}C_{ТИЭ} - \gamma P_{ВИЭ}C}, \quad (1.16)$$

где $C_{ТИЭ}$ – стоимость электроэнергии, вырабатываемой традиционными источниками, руб.;

γ – поправочный коэффициент.

Экономический эффект от использования ВИЭ [14]:

$$\mathcal{E}_{\mathcal{E}} = D_{ГЭ}T_{СЛ}(T_{СЛ} - T_{OK})(\mathcal{E}_{ВИЭ}C_{ТИЭ} - I_{\mathcal{E}})(C - C_{ТИЭ}), \quad (1.17)$$

где $D_{ГЭ}$ – годовой дефицит электроэнергии в регионе, кВт·ч/год;

$C_{ТИЭ}$ – удельная стоимость производства электроэнергии от ТИЭ (региональный тариф), руб/кВт·ч;

$\mathcal{E}_{ВИЭ}$ – электроэнергия, вырабатываемая ВИЭ в год, кВт·ч/год;

$I_{\mathcal{E}}$ – издержки эксплуатации, руб.

Определение сроков окупаемости и экономического эффекта по формулам (1.20 и 1.21) проводится для каждой энергетической установки (СФЭУ и ВЭУ) при разных их мощностях.

Экономически целесообразно применять ВИЭ, когда выполняется условие [14]:

$$T_{СЛ} \geq T_{OK}, T_{OK} - \min \quad (1.18)$$

Результаты исследований ученых, рассмотренные в [6, 7, 8, 18, 19, 20, 60, 69, 72] посвящены исследованию и оценки ресурсов и эффективности возобновляемых источников энергии, разработке методик оценки потенциал ВИЭ, инженерного расчёта мощности и выбора функциональных элементов ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установок, кроме того, большое внимание уделено особенностям проектирования и эксплуатации систем электроснабжения выполненных с использованием возобновляемых и традиционных источников энергии. В этих работах недостаточно уделено внимание вопросам разработки автономных систем небольшой мощности, улучшения эксплуатационно-технических характеристик функциональных элементов и оптимизации их структуры.

Работы ученых [14, 47, 69, 70, 84, 110, 114, 115] в основном посвящены улучшению технико-экономических и эксплуатационно-технических характеристик функциональных элементов ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установок, а также оптимизации режимов работы источников электроэнергии. Однако в этих работы недостаточно уделено внимание вопросам выбора рациональной мощности возобновляемых и традиционных источников энергии оптимизации режимов работы автономных систем электроснабжения с учетом графика нагрузок.

Наиболее близким к диссертационному исследованию являются исследования по разработке (АСЭ) фермерских хозяйств с использованием ВИЭ и резервной жидко-топливной электростанции, рассмотренные в [5]. В работе предложен математический алгоритм оптимизации подбора оборудования, необходимого для автономной электростанции. Результатом моделирования являлось определение стоимости 1 кВт·ч энергии, вырабатываемой ВИЭ и ДЭС при разной мощности оборудования, уровне потенциала возобновляемых источников и расходе топлива ДЭС. Рациональной считалась та структура, у которой ниже была стоимость выработки 1 кВт·ч энергии.

Недостатком рассмотренных исследований является то, что АСЭ располагается стационарно и привязана, только к одной группе потребителей электроэнергии переменного тока, при расчёте мощностей ВИЭ, ДЭС и емкости аккумуляторных батарей не учитываются случайные изменения потенциала ветровой и солнечной энергетики, а также график нагрузок. Кроме того, при длительных периодах низкого потенциала ВИЭ дефицит энергии восполняется ДЭС, что требует повышенной мощности станции и расхода топлива для её работы, что в комплексе повышает эксплуатационные затраты на стационарную АСЭ. Работа системы не автоматизирована.

Таким образом, сегодня вопросы разработки мобильных энергосистем малой мощности с улучшенными массогабаритными и технико-экономическими показателями недостаточно исследованы.

1.5 Выводы, цель и задачи исследований

Краснодарский край имеет высокий уровень потенциала ветровой и солнечной энергетики. Поэтому перспективным является направление применения МВСЭ для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ. К таким потребителям относятся потребители, применяемые в пчеловодстве, прудовых хозяйствах, в овцеводческих хозяйствах и в хозяйствах по выращиванию овощей.

Для повышения надежности электроснабжения автономных потребителей МФХ, поскольку характер поступления энергии от ВИЭ является нестабильным, в составе МВСЭ необходимо в качестве резервных источников использовать бензиновые или дизельные станции. В этом случае они будут иметь значительно меньшую установленную мощность, ниже уровень капитальных и эксплуатационных затрат, а также оказывать меньшее влияние на экологию.

Для определения мощности источников электроэнергии МВСЭ был проведён анализ мощности и режимов работы автономных потребителей электроэнергии МФХ, а также уровень потребляемой ими энергии в течение сезона их эксплуатации. Анализ показал, что в основном большая часть энергии необходима для обеспечения жизнедеятельности обслуживающего персонала и меньшая её часть, 20 –30 %, для обеспечения технологических процессов. Установлено, что среднесуточное потребление энергии хозяйствами, занимающимися производством мёда, рыбы, мяса и выращиванием овощей не превышает 30 кВт·ч.

Рассмотрены конструктивные решения и особенности работы известных технических решений мобильных электростанций отечественного и зарубежного производства, выполненных на ВИЭ. Основными недостатками рассмотренных станций является то, что в большинстве технических решений применяются ДЭС, которые вырабатывают основную долю энергии, в результате они имеют высокую стоимость, превышающую миллион рублей. Станции мощностью до 2 кВт в основном генерируют напряжение постоянного тока [115]. Кроме того, не решен вопрос надёжного, прежде всего, обеспечения бесперебойного электроснабжения

потребителей, из-за не стабильного характера поступления энергии от ВИЭ, а также оптимального выбора мощности разных источников электроэнергии для минимизации экономических затрат на проектирование и эксплуатацию МВСЭ.

Одним из важных функциональных элементов МВСЭ является инвертор, преобразующий напряжение постоянного тока, генерируемого ветроустановкой, солнечными или аккумуляторными батареями в напряжение переменного тока. Рассмотрены типовые схемные решения преобразователей и раскрыты их недостатки, основными из которых являются: небольшой диапазон стабилизации напряжения, не позволяющий системе управления преобразователем поддерживать требуемый уровень напряжения при резкопеременном (скачкообразном) характере нагрузки, что характерно для сельскохозяйственных потребителей электроэнергии; относительно низкое качество выходного напряжения дешевых инверторов, что не соответствует требованиям некоторого оборудования фермеров.

Для определения направлений, способствующих улучшению ЭТХ мобильных ветро-солнечных электростанций, проведён анализ основных характеристик функциональных элементов станции, а также их достоинств и недостатков. Анализ показал большой разброс цен на функциональные элементы при небольших отклонениях их мощностей, что затрудняет разработку рациональной структуры МВСЭ.

Проблема состоит в том, что несмотря на большое разнообразие комплектации автономных электростанций на ВИЭ и научных разработок по данной теме сегодня отсутствуют мобильные энергетические установки малой мощности для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ.

Рабочая гипотеза состоит в том, что если провести научные исследования по определению рациональному соотношения мощностей ветровых и солнечных энергоустановок, а также традиционных источников, и графика нагрузок автономных потребителей, то можно получить соответствующие закономерности, позволяющие разрабатывать МВСЭ с минимальными массогабаритными и высокими технико-экономическими показателями.

Целью диссертационного исследования является обоснование параметров и режимов работы мобильной ветро-солнечной электростанции с минимальными массогабаритными и высокими технико-экономическими показателями для электроснабжения автономных потребителей малых фермерских хозяйств.

Для достижения поставленной цели определены следующие *задачи исследований*.

1. Разработать структурную схему мобильной ветро-солнечной электростанции для автономных потребителей малых фермерских хозяйств и алгоритм работы автоматизированной системы управления станции в основных режимах её функционирования.

2. Разработать методику расчёта мобильной ветро-солнечной электростанции малой мощности, позволяющей определить ее параметры и режимы работы, а также рациональное соотношение мощностей отдельных источников энергии.

3. Разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы инвертора напряжения.

4. Разработать компьютерную модель инвертора напряжения и провести её исследования.

5. Разработать физическую модель инвертора, провести экспериментальные исследования и дать оценку достоверности полученных результатов.

6. Разработать способ определения рациональной структуры мобильной энергоустановки на основе экономических и массогабаритных показателей.

7. Провести технико-экономическое обоснование применения и производства мобильных электростанций.

2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ И МЕТОДИКИ РАСЧЁТА МОБИЛЬНОЙ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

2.1 Разработка структурной схемы и алгоритма работы системы управления мобильной ветро-солнечной электростанцией

С учётом, проведённого анализа, в том числе эксплуатационно-технических, экономических показателей, а также анализа характеристик основных функциональных элементов АСЭ разработана структурная схема МВСЭ, которая приведена на рисунке 2.1. Схема содержит: ВЭУ – ветроэнергетическая установка роторного типа, генерирующая напряжение постоянного тока; СБ и АБ – солнечные и аккумуляторные батареи; БЭС – бензоэлектростанцию; И – инвертор с высокочастотным промежуточным преобразованием; К – контроллер заряда АБ. На схеме также показаны; Ш1 и Ш2 – шины постоянного и переменного тока; Н1 и Н2 – нагрузка постоянного и переменного тока; АСУ – автоматическая система управления, которая через коммутационные аппараты (на рисунке 2.1 не показаны), осуществляет подключение и отключение функциональных элементов системы, при этом, имеет непосредственную связь с контроллером К и контролирует параметры электроэнергии станции.

При подаче питания на автоматическую систему управления АСУ (вручную или дистанционно) осуществляется запуск МВСЭ – ВЭУ и СБ генерируют электроэнергию, осуществляется заряд аккумуляторных батарей через вход-выход контроллера заряда К, который осуществляет трёхэтапный режим заряда и защищает от перезаряда и глубокого разряда АБ, что позволяет обеспечить ресурс их эксплуатации 10–12 лет. Первый выход контроллера соединён с шиной постоянного тока Ш1 к которой подключается нагрузка Н1. Второй выход контроллера подключён к инвертору И, который преобразует напряжение постоянного тока в напряжение переменного синусоидального тока, которое прикладывается к шине переменного тока Ш2 к которой присоединяется нагрузка Н2.

Когда вырабатываемой мощности ВЭУ и СБ является недостаточно для покрытия потребительской нагрузки, то АСУ включает АБ в режим источника электроэнергии, а когда энергия в АБ подошла к критическому допустимому разряду, то АСУ в работу включает бензоэлектростанцию БЭС.

Повысить КПД мобильной станции можно если СБ подключить к инвертору И, минуя контроллер заряда К (пунктирная линия на рисунке 2.1). В этом случае заряд АБ осуществляет ВЭУ. Такой режим работы может быть применён, если более 80 % мощности, составляет мощность потребителей электроэнергии переменного тока [17, 76, 87].

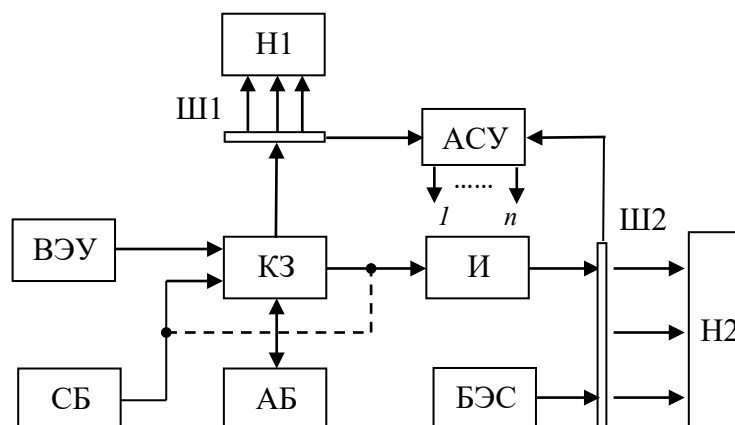


Рисунок 2.1 – Структурная схема МВСЭ:
1... n – выводы к источникам электроэнергии

Минимизировать массогабаритные показатели МВСЭ можно за счёт рационального выбора мощности возобновляемых и традиционных источников энергии и адаптивного управления режимами работы источников электроэнергии посредством АСУ с учётом приоритета нагрузки [115, 130].

Повысить эксплуатационно-технические характеристики МВСЭ можно, если в место традиционного инвертора применить обратимый инвертор, т. е. инвертор, пропускающий потоки энергии в обоих направлениях [19, 26]. В этом случае целесообразно применить вторую ВЭУ, генерирующую напряжение переменного тока, и подключенной соответственно к шине Ш2 (рисунок 2.1).

Применение в составе МВСЭ современных средств автоматизации, предполагает разработку алгоритмов её работы. При этом, алгоритм работы МВСЭ должен учитывать все режимы работы и энергетические параметры, связанные с её функционированием, среди которых являются:

- пиковая мощность и графики нагрузки переменного и постоянного тока, включая потребляемую энергию за определенный период (сутки, неделю, сезон);
- мощность ВЭУ и СБ;
- мощность традиционных источников, включая АБ и БЭС.

При моделировании работы МВСЭ на конкретные потребители электроэнергии необходимо учитывать все ситуации, возникающие при функционировании системы, которые теоретически могут возникнуть, с целью выбора мощности основных функциональных элементов или отказа от некоторых из них.

В соответствии со структурной схемой (рисунок 2.1) и режимами работы потребителей разработан алгоритм работы автоматизированной системы управления МВСЭ, приведённой на рисунке 2.2. АСУ считывает следующие параметры: текущие необходимые значения мощности нагрузки переменного и постоянного тока – P_H ; мощность, вырабатываемую СБ – $P_{СБ}$; мощность, вырабатываемую ВЭУ – $P_{ВЭУ}$; суммарную мощность ВИЭ – $P_{ВИЭ}$; мощность заряда АБ – $P_З$.

Для описания алгоритма работы введены следующие обозначения:

$P_{БЭС}$ – мощность бензоэлектростанции БЭС, требуемая в текущий момент времени;

$P_{АБ}$ – мощность, которую должна отдать АБ в текущий момент времени;

$P_{ЗР}$ – мощность, которую МВСЭ может выделить для заряда АБ в текущий момент времени;

P_D – мощность дополнительного источника;

P_B – мощность, рассеиваемая в текущий момент времени на балластном сопротивлении (на рисунке 2.1 балластная нагрузка не показана);

$КА$ – состояние коммутационного аппарата, подключающего БЭС, если $КА = 0$, то аппарат отключен, а если $КА = 1$ – включен (БЭС с электростартером, который её запускает от замыкающего контакта реле, управляемого АСУ);

Δt – время в течение которого коммутационный аппарат КА не изменяет своё состояние, в исходном состоянии $\Delta t = 0$;

t_0 и t_1 – минимальный период времени с начала отключения и отключения, соответственно, резервного источника – БЭС.

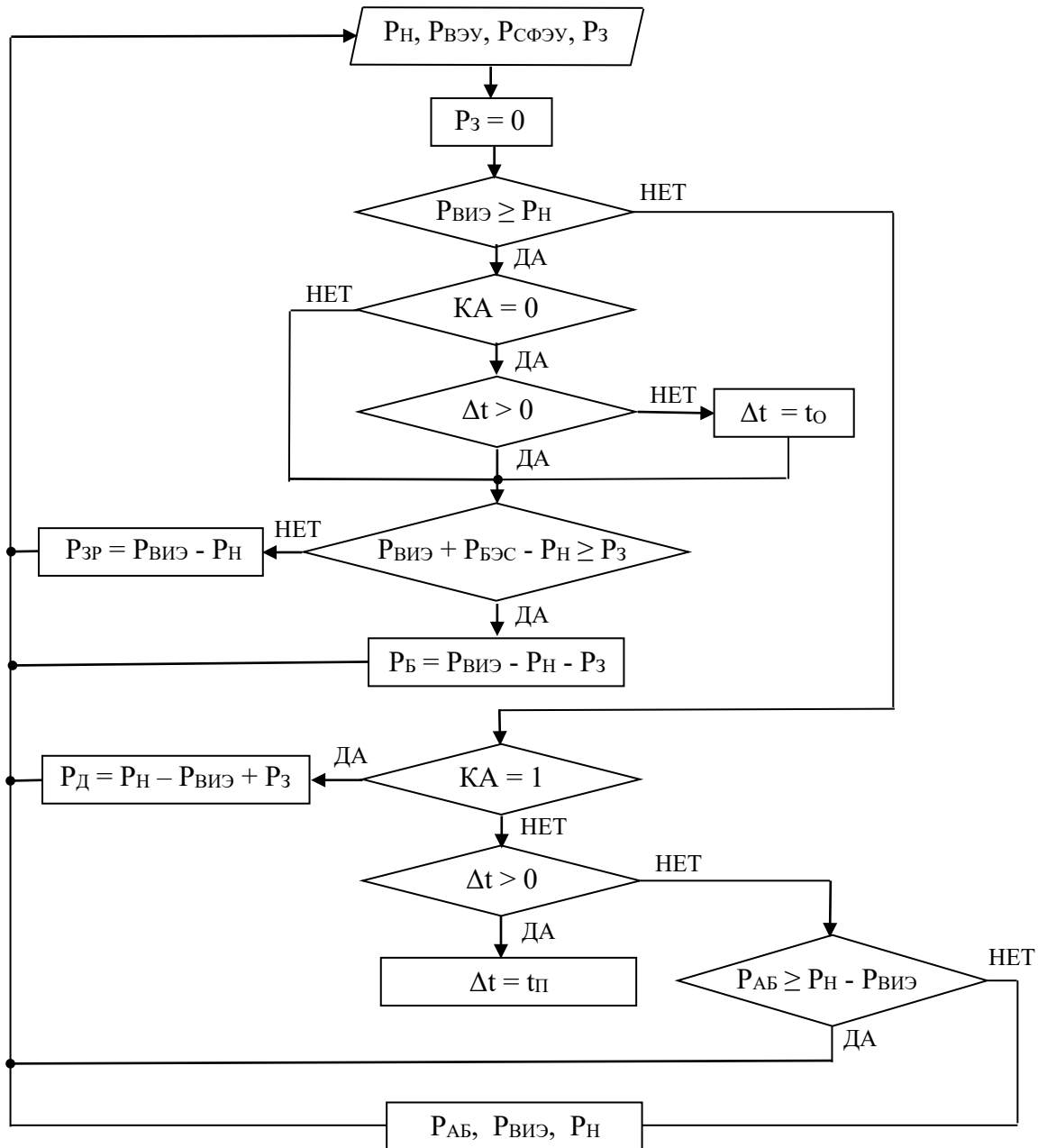


Рисунок 2.2 – Алгоритм работы автоматизированной системы управления МВСЭ

Если АБ заряжена на 100 %, то значение $P_З = 0$. Вводятся изменения в каждый из режимов в зависимости от мощности, вырабатываемой возобновляемыми источниками $P_{ВИЭ}$.

Если $P_{ВИЭ} \geq P_H$, то резервный источник БЭС отключен, электроснабжение нагрузки осуществляется от ВИЭ.

Если $P_{ВИЭ} < P_H$, то при подключении к дополнительному источнику электроэнергии (БЭС), подзарядка АБ происходит за счёт дополнительной вырабатываемой энергии.

Если величина мощности $P_{АБ}$ недостаточна для рассматриваемого режима работы потребителей, то принимаются меры по повышению мощности источников электроэнергии МВСЭ.

Рассмотренный алгоритм работы МВСЭ, выполненной на базе ВИЭ, предназначен для работы в тех случаях, когда АБ имеют небольшую ёмкость и применяются в основном для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей при переходе питания от одного источника к другому. В этом случае основными источниками для нагрузки являются ВИЭ, а резервным БЭС, недостаток энергии пополняется АБ. Если же увеличить ёмкость АБ, то алгоритм можно изменить, где функцию резервного источника будет выполнять АБ, и только после её разряда в работу включается БЭС. Выбор одного из двух вариантов зависит от оценки технико-экономических и массогабаритных показателей МВСЭ.

На практике аппаратная реализация алгоритмов может быть различной. В основном переход к следующей операции происходит при изменении какого-либо параметра (напряжения, тока, мощности в комплексе). Наличие алгоритма работы МВСЭ во всех режимах её функционирования позволяет повысить эффективность разработки программного аппарата для прошивки микропроцессора АСУ.

2.2 Разработка методики расчёта мобильной ветро-солнечной электростанции

Применение в составе МВСЭ двух видов возобновляемых источников СФЭУ и ВЭУ повышает надёжность электроснабжения автономных потребителей электроэнергии. Однако выработка энергии этими источниками зависит от клима-

тических условий, изменение которых имеет случайный характер. Поэтому в МВСЭ, выполненных на базе, рассматриваемых ВИЭ, могут возникать неблагоприятные временные интервалы, когда потенциал солнечной или (и) ветровой энергетики не позволит выработать необходимый объем электроэнергии. А с другой стороны МВСЭ должна иметь достаточно резервной мощности для обеспечения надёжного электроснабжения автономных потребителей электроэнергии в случае внезапного изменения величины генерации или мощности нагрузки. Кроме того, не правильный выбор мощности и режимов работы источников электроэнергии МВСЭ может привести к дополнительным топливным затратам при использовании в системе БЭС, к выбору завышенной емкости АБ и как следствие повышению стоимости и ухудшению массогабаритных показателей мобильной автономной системы [56, 58, 120].

Задача выбора соотношения мощностей ВЭУ, СФЭУ и БЭС, а также емкости АБ усложняется тем, что среднюю выработку электроэнергии МВСЭ можно спрогнозировать с относительной точностью за определённый период (месяц, сезон, год), но спрогнозировать среднюю выработку электроэнергии электростанцией в течение недели, тем более суток, достаточно сложная задача, прежде всего, из-за внезапно возникающей переменной облачности, которая приводит к изменению не только уровня солнечной радиации, но и скорости ветра.

Таким образом, оптимизация соотношения мощностей ВЭУ, СФЭУ, БЭС и АБ мобильной электростанции является важной и сложной задачей, от решения которой зависят её эксплуатационно-технические и технико-экономические показатели [58, 128, 129].

Для оценки технико-экономических и эксплуатационно-технических характеристик МВСЭ на этапе её проектирования предлагается упрощенная методика инженерного расчёта параметров основных функциональных элементов автономной электростанции на примере прудового хозяйства (п. 1.1).

Методика расчёта и выбора мощности источников МВСЭ представлена в виде алгоритма на рисунке 2.3. В основу методики положены экономические показатели источников электроэнергии МВСЭ, включая ВЭУ, СБ и АБ, а также

бензоэлектростанции (БЭС). Нижеприведенная методика включает конкретные расчеты для потребителя на территории Краснодарского края с объемом потребления энергии 30 кВт·ч.

Последовательность расчёта мобильной ветро-солнечной электростанции.

1. Строятся графики оценки потенциалов ветровой и солнечной энергетики. При этом, для ветровой энергетики это средняя скорость ветра $v = f(t)$, а для солнечной энергетики – интенсивность солнечного излучения $\mathcal{E}_C = f(t)$, измеряемая $Вт/м^2$ (рисунок 2.4).

2. Строятся зависимости стоимости основных функциональных элементов МВСЭ от мощности (рисунки 2.5–2.8). При этом целевая функция имеет вид:

$$C_{МВСЭ} = f(C_{ВЭУ}, C_{СБ}, C_{АБ}, C_{БЭС}) \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

где $C_{МВСЭ}$, $C_{ВЭУ}$, $C_{СБ}$, $C_{АБ}$, $C_{БЭС}$ – стоимость МВСЭ, ВЭУ, СБ, АБ и БЭС соответственно.

Для минимизации целевой функции (2.1) необходимо знать зависимости сложившихся цен на оборудование от мощности. При этом, при определении стоимости БЭС необходимо учитывать также время её работы и стоимость топлива. Уравнения аппроксимации, полученные при определении стоимости функциональных элементов МВСЭ позволяют итерационным методом находить оптимальное сочетание стоимостных показателей оборудования (рисунок 2.3).

3. По среднемесячным значениям строится суточный график нагрузок $P_H = f(t)$ графиками энергии, вырабатываемой ВИЭ (рисунок 2.4).

4. Определяются среднемесячные значения энергии солнечного излучения W_C и энергии потребляемой нагрузкой W_H , используя графоаналитические методы расчёта для определения площади под кривой. Для нашего примера $W_C \approx 20,5$ кВт·ч, $W_H \approx 30$ кВт·ч.

5. На основании анализа графика нагрузок и определении промежутка времени, когда поступление энергии от ВИЭ будет низким или вообще отсутствовать определяется емкость аккумуляторных батарей $C_{АБ}$ для обеспечения энергией потребителей. В соответствии с графиком нагрузки $P_H = f(t)$ (рисунок 2.4) не более

чем 6 ч. в сутки не будет поступать энергия от ВИЭ, при этом, в это время нагрузка будет потреблять энергии около $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

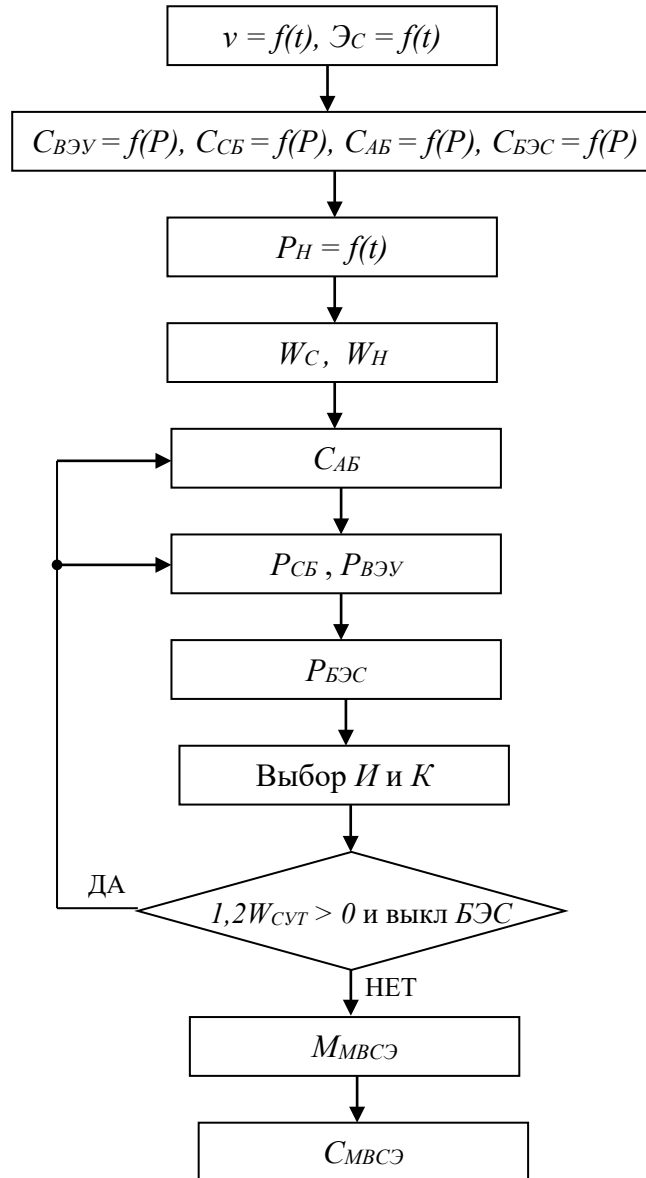


Рисунок 2.3 – Алгоритм инженерного расчёта параметров и выбора мощности источников электроэнергии МВСЭ

Чтобы не допускать разряд АБ более 30 %, для продления срока их службы, с учетом понижения потенциала ВИЭ на 20 %, выбираем батарею емкостью $100 \text{ А}\cdot\text{ч}$, что позволит вырабатывать энергию $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ в течение 6 ч, когда ВИЭ не генерируют энергию, а остальная энергия будет резервной в случае изменения климатических условий.

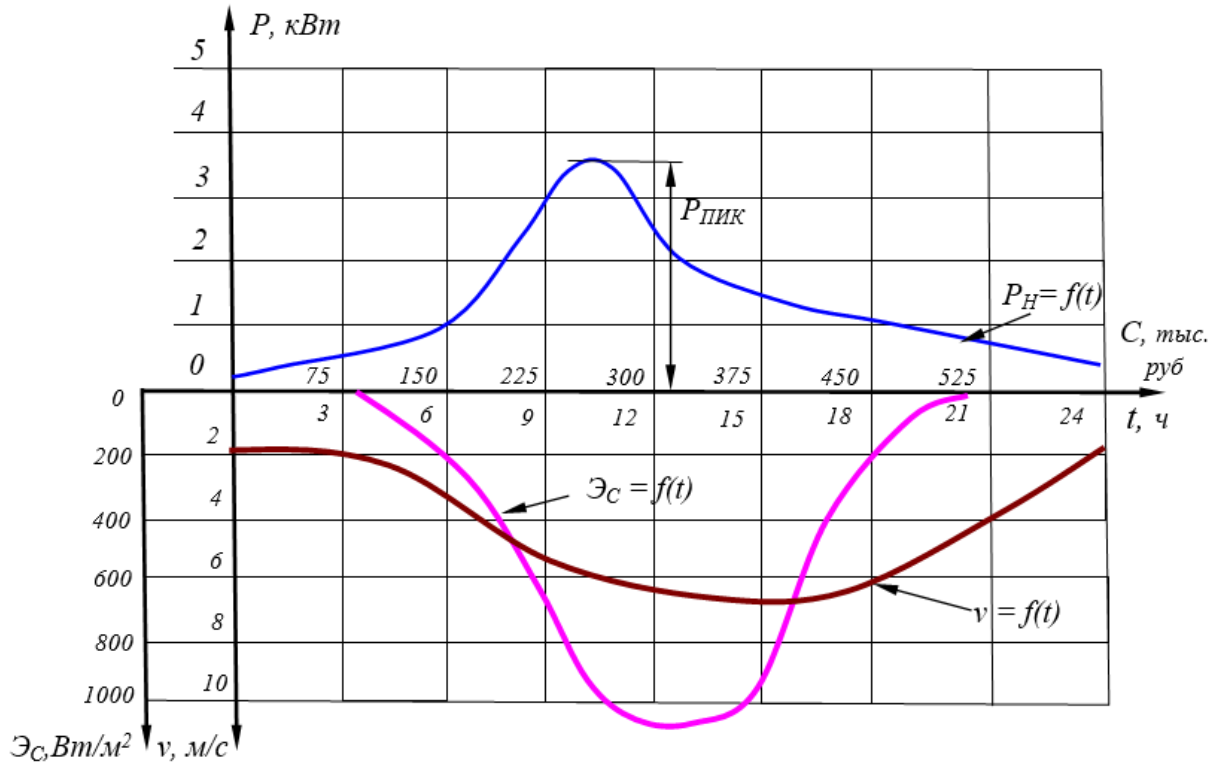


Рисунок 2.4 – Средние месячные значения графика нагрузки потребителей $P_{\Pi} = f(t)$, и потенциал ветровой и солнечной энергетики (средняя скорость ветра $v = f(t)$ и потока энергии Солнца $\mathcal{E}_c = f(t)$ соответственно)

Для зависимости $C_{ВЭУ} = f(P_{ВЭУ})$, приведённой на рисунке 2.5, уравнение аппроксимации имеет вид:

$$y = 3E - 07x^4 - 0,0011x^3 + 1,2889x^2 - 320,21x + 55846. \quad (2.2)$$

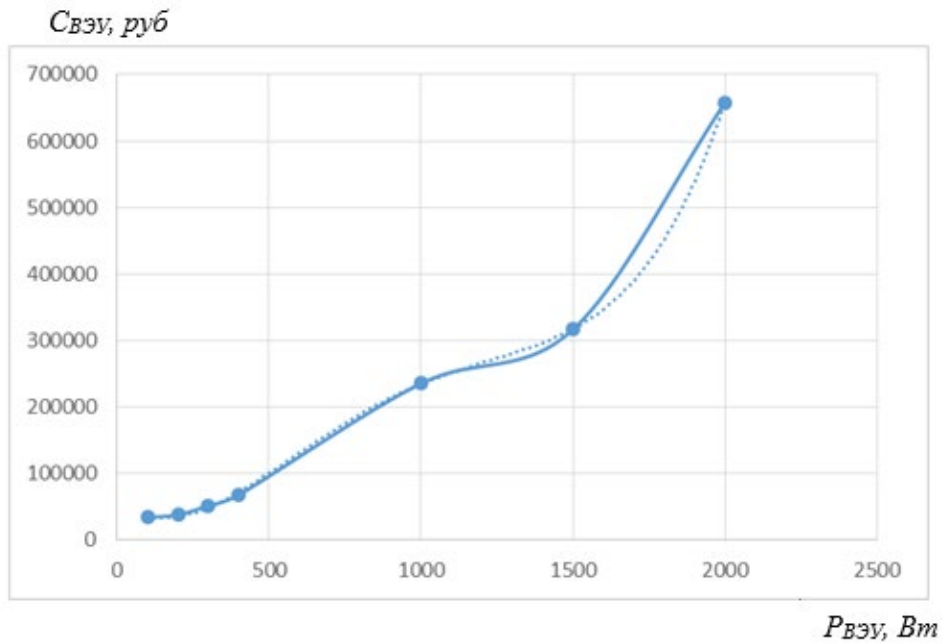


Рисунок 2.5 – Зависимости стоимости роторных ВЭУ от мощности $C_{ВЭУ} = f(P_{ВЭУ})$, значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,9999$

Для зависимости $C_{СБ} = f(P_{СБ})$, приведённой на рисунке 2.6, уравнение аппроксимации имеет вид:

$$y = -2E-05x^4 + 0,0381x^3 - 24,962x^2 + 7219,3x - 758754. \quad (2.3)$$

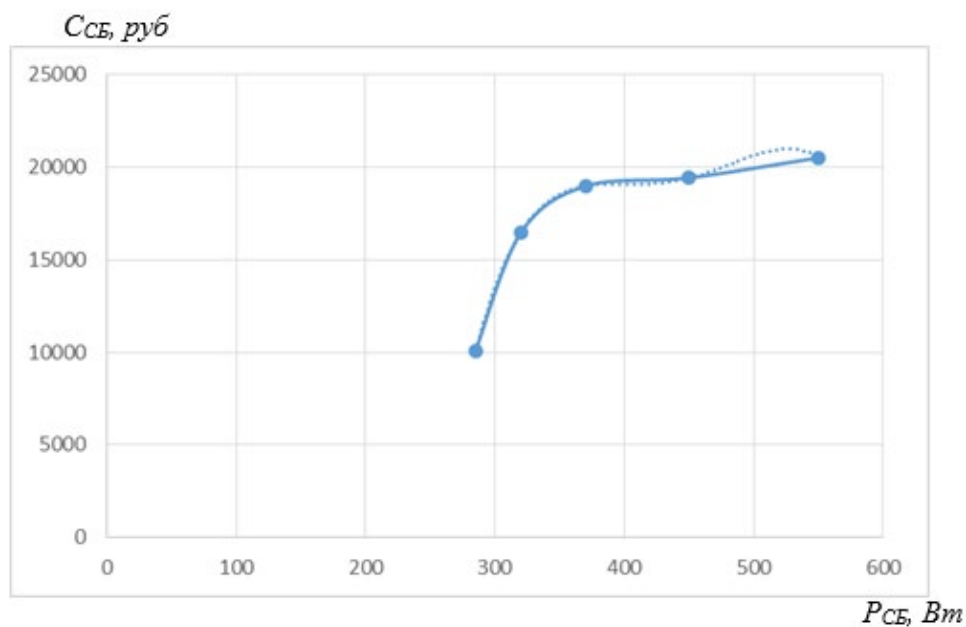


Рисунок 2.6 – Зависимости стоимости СБ от мощности $C_{СБ} = f(P_{СБ})$, значение коэффициента детерминации $R^2 = 1$

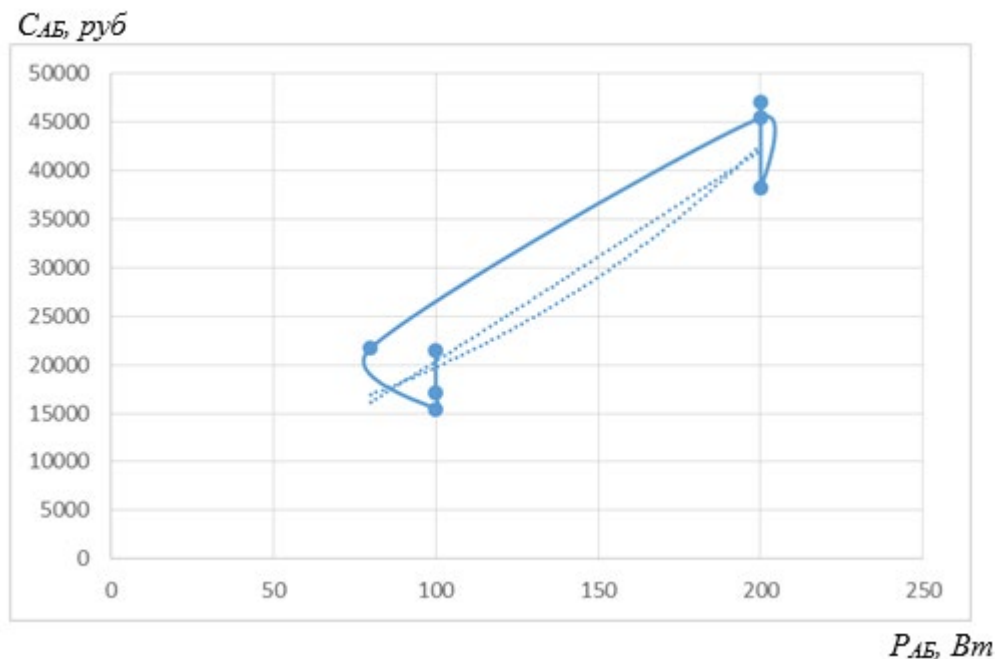


Рисунок 2.7 – Зависимости стоимости АБ от мощности $C_{СБ} = f(P_{СБ})$, значение коэффициента детерминации $R_1^2 = 0,8295$ (сплошная кривая) и $R_1^2 = 0,8677$ (пунктирная кривая)

Для зависимости $C_{AB} = f(P_{AB})$, приведённой на рисунке 2.7, уравнение аппроксимации имеет вид:

$$y = 164,1x^{1,0469}. \quad (2.4)$$

$$y = 9116,2e^{0,0077x}. \quad (2.5)$$

Уравнение (2.4), описывает сплошную кривую (рисунок 2.7), а уравнение (2.5) – пунктирную кривую (рисунок 2.7).

Для зависимости $C_{БЭС} = f(P_{БЭС})$, приведённой на рисунке 2.8, уравнение аппроксимации имеет вид:

$$y = 0,007x^2 - 15,807x + 26038. \quad (2.6)$$

6. Определяется установленная мощность СБ и ВЭУ ($P_{СБ}$ и $P_{ВЭУ}$) с учётом потенциала и энергии, вырабатываемой ВИЭ, их стоимости, которая находится примерно в отношении 1/3 при мощности 500 Вт, при мощности больше 1 кВт – 1/5...7, а также энергии, необходимой для заряда АБ.

С учётом рассмотренных условий мощность солнечных батарей $P_{СБ} = 2,5$ кВт, а ветроэнергетической установки $P_{ВЭУ} = 300$ Вт. Пиковая мощность $P_{ПИК} = 3,6$ кВт покрывается энергией АБ или БЭС.

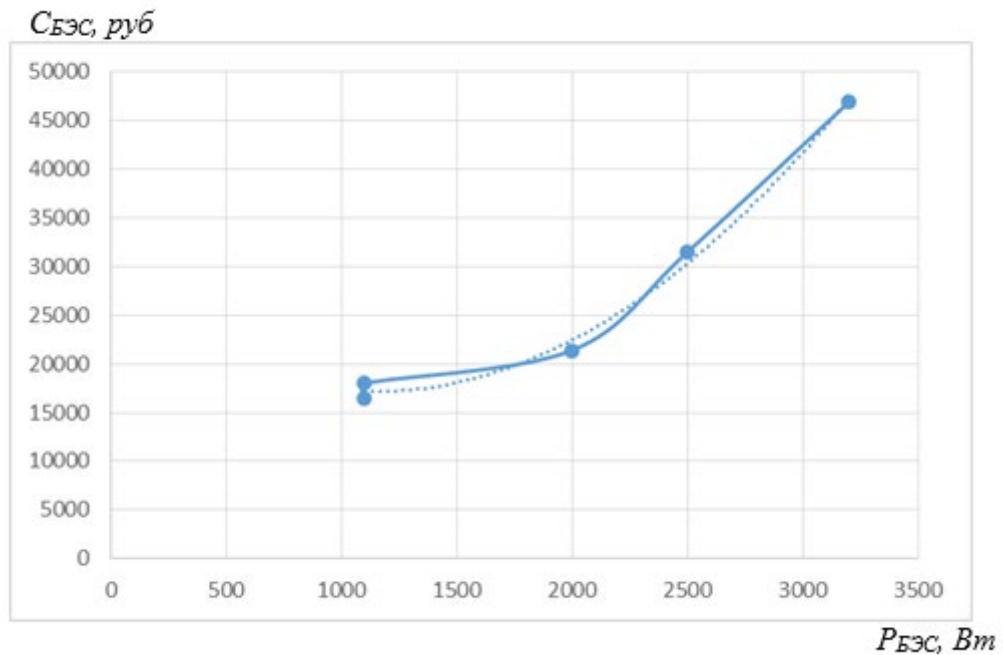


Рисунок 2.8 – Зависимости стоимости БЭС от мощности $C_{БЭС} = f(P_{БЭС})$, значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,9941$

7. Определяется мощность БЭС ($P_{БЭС}$) на основании анализа потенциала ВИЭ и суточных графиков нагрузки. Для рассмотренного алгоритма работы, когда БЭС является резервным источником, его мощность должна не превышать 2 кВт. Мощность выбрана с учётом, того, что суммарное время работы станции в течение сезона для самых неблагоприятных условий (низком уровне потенциала ВИЭ) будет составлять не более 600 ч.

8. Осуществляется выбор инвертора И контроллера заряда КЗ (рисунок 2.1) с учётом, что номинальное напряжение постоянного тока равно 24 В, а суммарная мощность источников электроэнергии составляет не более 3 кВт.

9. Проводится оценка суточного энергобаланса с учетом, что АБ предварительно были заряжены, согласно формулы:

$$W_{СУТ} \geq (W_{ВЭУСУТ} + W_{СБСУТ} + W_{АБСУТ}) - W_{НСУТ}, \quad (2.7)$$

где $W_{ВЭУСУТ}$, $W_{СБСУТ}$, $W_{АБСУТ}$ – энергия, вырабатываемая ВЭУ, СБ и АБ в сутки, кВт·ч/сут;

$W_{НСУТ}$ – энергия, необходимая для нагрузки в течение суток, кВт·ч/сут.

Если баланс мощности по формуле (2.7) получается отрицательным, то недостаток энергии покрывается её выработкой БЭС. Если же положительным, то уменьшается мощность источников электроэнергии, по иерархии: ВЭУ, АБ, СБ (рисунок 2.3).

10. Определяются массогабаритные показатели МВСЭ по формуле:

$$M_{МВСЭ} = M_{АП} + K_K \left(\sum_{i=1}^n M_{ВЭУi} + \sum_{j=1}^m M_{СБj} + \sum_{s=1}^k M_{АБs} + \sum_{h=1}^p M_{Иh} \right), \quad (2.8)$$

где $M_{АП}$ – масса автоприцепа;

$K_K = 1,2-1,3$ – конструктивный коэффициент, учитывающий массу каркаса, крепежных деталей, коммутационных аппаратов и соединительных проводов;

$M_{ВЭУ}$, $M_{СБ}$, $M_{АБ}$, $M_{И}$ – масса ветроэнергетической установки, солнечных батарей, аккумуляторных батарей и инвертора, соответственно;

n , m , k , p – общее количество ветроэнергетических установок, солнечных батарей, аккумуляторных батарей и инверторов.

Контроллер заряда имеет небольшую массу (на 60–80 А не более 2 кг) поэтому в формуле (2.7) её значение не учитывается.

Определяются массогабаритные показатели МВСЭ по (2.8). Ориентировочная масса МВСЭ с автоприцепом составляет 550–600 кг.

11. Определяется ориентировочная стоимость МВСЭ с учётом стоимости функциональных элементов (см. п.1.4) по формуле:

$$C_{МВСЭ} = C_{АП} + K_C \left(\sum_{i=1}^n C_{ВЭУi} + \sum_{j=1}^m C_{СБj} + \sum_{s=1}^k C_{АБs} + \sum_{h=1}^p C_{Илh} \right), \quad (2.9)$$

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

Ориентировочно стоимость проектируемой МВСЭ составляет около 250 тыс. руб.

12. Строится диаграмма распределения выработки электроэнергии между источниками электроэнергии в разных режимах функционирования МВСЭ и разрабатываются рекомендации по её эксплуатации. На рисунке 2.9, для примера, приведены диаграммы распределения выработки электроэнергии между источниками для номинального режима работы при высоком уровне потенциала ВИЭ.

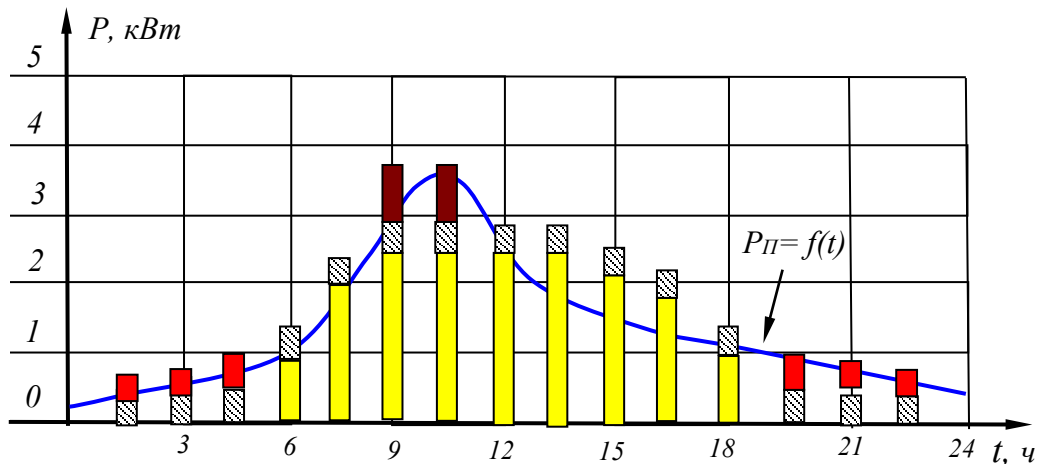


Рисунок 2.9 – Распределение выработки электроэнергии между источниками:

■ - энергия, вырабатываемая СБ; ■ - энергия, вырабатываемая ВЭУ;
 ■ - энергия, отдаваемая АБ; ■ - энергия вырабатываемая БЭС.

Поскольку максимальная мощность нагрузкой 2,5 кВт потребляется не более чем 5 ч, и среди нагрузки прудового хозяйства нет потребителей 1 категории, то целесообразно питание некоторых потребителей осуществлять после 14.00 ч ($P_H = f(t)$, рисунок 2.9). Это позволит повысить эксплуатационно-технические характеристики МВСЭ.

Таким образом, в основу методики расчёта параметров и определения оптимального соотношения мощностей источников электроэнергии МВСЭ положены их экономические показатели. Определено, что в настоящее время оптимальное соотношение мощностей между источниками электроэнергии ВЭУ, СБ и АБ мобильных электростанций МФХ с учётом их экономических показателей, находится в процентном соотношении: 15/65/20 %, с учётом, что за 100 % взята пиковая мощность потребителей электроэнергии. При этом, эта мощность БЭС должна составлять 40–60 %. Это соотношение, как показывают расчёты, не значительно изменяется при электроснабжении МФХ, занимающихся другими видами деятельности, рассмотренные в п. 1.1, и зависит в основном от параметров и режимов работы потребителей электроэнергии.

На основании результатов анализа научной литературы, проведённых исследований, с учётом рассмотренной методики расчёта МВСЭ, раскрыты основные этапы проектирования мобильных электростанций (МЭС):

1. Определяются параметры и режимы работы автономных потребителей электроэнергии на основании которых строится график нагрузки.
2. Определяется потенциал ветровой и солнечной энергетики за контрольный период.
3. Проводится расчёт параметров и выбор основных функциональных элементов ветро-солнечной электростанции, включая резервные источники электроэнергии и АБ.
4. Определяется стоимости функциональных элементов МЭС от мощности.
5. Разрабатываются структурно-схемное решение МЭС с разным сочетанием по мощности источников электроэнергии.

6. Проводится расчёт и оценка структурно-схемных решений МЭС по показателям оценки их эффективности.

7. Определяется рациональное структурно-схемное решение МЭС отвечающее требованиям технического задания, прежде всего, по технико-экономическим и массогабаритным показателям.

8. Разрабатываются практические рекомендации по проектированию и эксплуатации МЭС.

2.3 Выводы

С учётом, проведённого анализа, в том числе эксплуатационно-технических, технико-экономических показателей известных технических решений АСЭ, а также анализа технических характеристик современных функциональных элементов разработана структурная схема МВСЭ, которая включает возобновляемые источники: ветроустановку и солнечные батареи, традиционные источники: аккумуляторные батареи и бензоэлектростанцию, инвертор напряжения и контроллер заряда, а также автоматическую систему управления (АСУ).

Разработан алгоритм работы АСУ во всех режимах её функционирования, которая посредством коммутационных аппаратов, осуществляет подключение и отключение функциональных элементов системы, при этом, имеет непосредственную связь с контроллером и контролирует параметры электроэнергии станции.

Разработана методика расчёта МВСЭ, которая итерационным методом позволяет на этапе проектирования определить параметры станции с учётом потенциала ВИЭ и графика нагрузок, мощность источников электроэнергии ВЭУ, СБ и БЭС, а также емкость АБ. За основу методики расчёта взяты экономические показатели функциональных элементов МВСЭ. Результатами расчёта также являются рациональные массогабаритные показатели и стоимость МВСЭ. В качестве примера рассмотрен вариант МФХ, находящегося на Юге России

с объемом потребления 30 кВт·ч. Ориентировочные показатели массы МВСЭ с автоприцепом составляет 550–600 кг, а стоимость станции составляет около 250 тыс. руб при суммарной мощности ВИЭ 3 кВт, мощности резервного источника 2 кВт и емкость АБ 100 А·ч.

На основании анализа научной литературы и с учётом рассмотренной методики расчёта МВСЭ, где основу положены экономические показатели источников электроэнергии станции, включая ВЭУ, СБ и АБ, а также бензоэлектростанции (БЭС) раскрыты основные этапы проектирования мобильных электростанций.

3 РАЗРАБОТКА ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

3.1 Разработка функциональной схемы

Проводился анализ известных структурно-схемных решений автономных инверторов (АИ), применяемых в автономных системах электроснабжения (АСЭ) [4, 7–10]. Определены особенности их конструкции и проведён анализ работы в основных режимах функционирования.

Эффективным способом уменьшения числа силовых электронных приборов в составе схемы АИ является применение трансформатора, который содержит среднюю точку в первичной и вторичной обмотках трансформатора. Кроме того, значительно можно уменьшить массогабаритные показатели трансформатора и реактивных элементов схемы инвертора, применяемых в составе выходного фильтра, если сформировать промежуточную синусоиду с частотой 2 кГц.

На рисунке 3.1 приведена, разработанная функциональная схема АИ с промежуточным высокочастотным преобразованием, а на рисунке 3.2 приведены диаграммы напряжений, поясняющие принцип её работы.

Силовая часть функциональной схемы АИ (рисунок 3.1) содержит: С – конденсатор, выполняющий функции входного фильтра; И – высокочастотный инвертор, преобразующий напряжение постоянного тока в высокочастотное напряжение переменного тока, выполненный на транзисторах VT1 и VT2; Т – согласующий трансформатор; РВ – реверсивный выпрямитель, формирующий напряжение с частотой тока 50 Гц из участков высокочастотного напряжения, выполненный на транзисторах VT3 и VT4, содержащий выходной пассивный Г-образный фильтр, выполненный на реактивных элементах C_{ϕ} и L_{ϕ} ; VD1–VD4 – обратные диоды, предназначенные для защиты от обратных токов, которые могут возникать при работе транзисторов преобразователя и при включении или отключении потребителей электроэнергии.

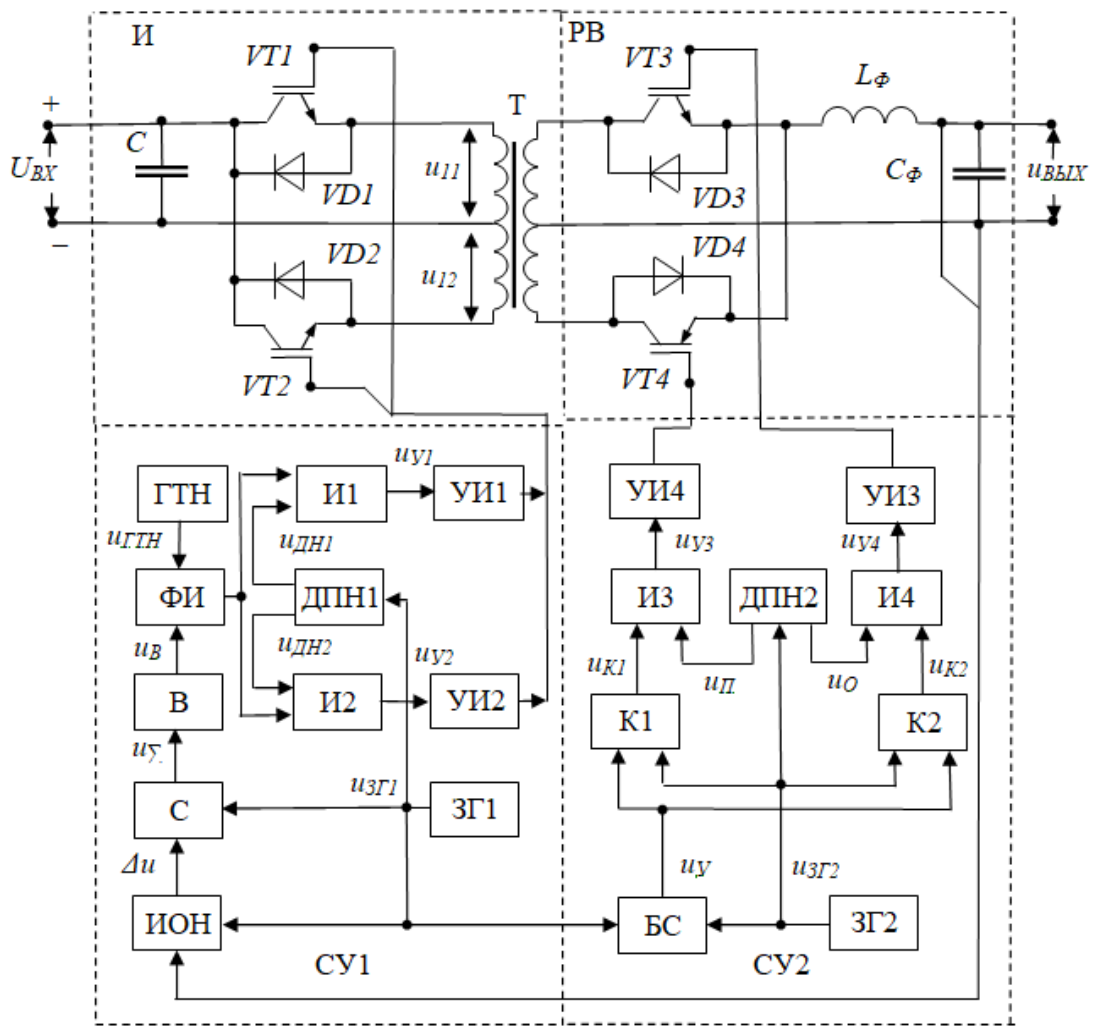


Рисунок 3.1 – Функциональная схема преобразователя с высокочастотным промежуточным преобразованием на реверсивном выпрямителе

На рисунке 3.1 показаны также СУ1 – блок автоматической системы управления, формирующий управляющие сигналы для транзисторов $VT1$ и $VT2$, высокочастотной схемы преобразования, и СУ2 – блок автоматической системы управления СУ2, формирующий управляющие сигналы для транзисторов $VT3$ и $VT4$ реверсивного выпрямителя РВ. На рисунке 3.1 источник питания постоянного тока функциональных элементов блоков управления СУ1 и СУ2 не показан.

Принцип работы блока автоматической системы управления СУ1 по преобразованию напряжения постоянного тока в переменный и блока системы управления СУ2 по преобразованию высокочастотного напряжения в напряжение пониженной частоты описан алгоритмом, который приведён на рисунке 3.2.

Исходными данными являются: входное и выходное напряжение преобразователя $U_{ВХ}$ и $u_{ВЫХ}$; частота высокочастотного преобразования $u_{ЗГ1}$; частота на выходе преобразователя $u_{ЗГ2}$; частота генератора треугольного напряжения $u_{ГТН}$. Номинальный режим работы соответствует равенству выходного напряжения преобразователя номинальному значению, т.е. когда $u_{ВЫХ} = u_{Н}$.

Преобразование напряжения постоянного тока в переменный ток происходит следующим образом (работа блока СУ1). Задающий генератор ЗГ1 (рисунок 3.1) формирует сигнал $u_{ЗГ1}$ синусоидальной формы повышенной частоты, который синхронизирует работу датчика полярности напряжения ДПН1, сумматора С, измерителя отклонения напряжения ИОН и блока синхронизации БС блока автоматической системы управления СУ2. Вход измерителя отклонения напряжения ИОН, соединён с выходом преобразователя. В измерителе происходит измерение отклонения напряжения Δu от номинального значения. В номинально режиме работы $\Delta u = 0$, в этом случае сигнал с выхода сумматора $u_{\Sigma} = u_{ЗГ1}$ (рисунок 3.2). На выходе выпрямителя В формируется сигнал напряжения постоянного тока $u_{В1}$ (рисунок 3.3, б). В формирователе импульсов ФИ происходит сравнение двух сигналов $u_{В1}$ и сигнала $u_{ГТН}$, который формируется генератором треугольного напряжения ГТН (рисунок 3.1). Когда $u_{ГТН} < u_{В1}$ (рисунок 3.2) на выходе формирователя импульсов ФИ формируются управляющие импульсы (рисунок 3, б). Эти импульсы поступают на первые входы логических элементов И1 и И2 (рисунок 3.1). Логический элемент И1 срабатывает, когда на второй его вход поступает сигнал $u_{ДН1}$ о положительной полярности $u_{ЗГ1}$, а на логический элемент И2, когда на второй его вход поступает сигнал $u_{ДН2}$ об отрицательной полярности сигнала $u_{ЗГ1}$. Сигналы о полярности напряжения $u_{ЗГ1}$ формирует датчик полярности напряжения ДПН1 (рисунок 3.1).

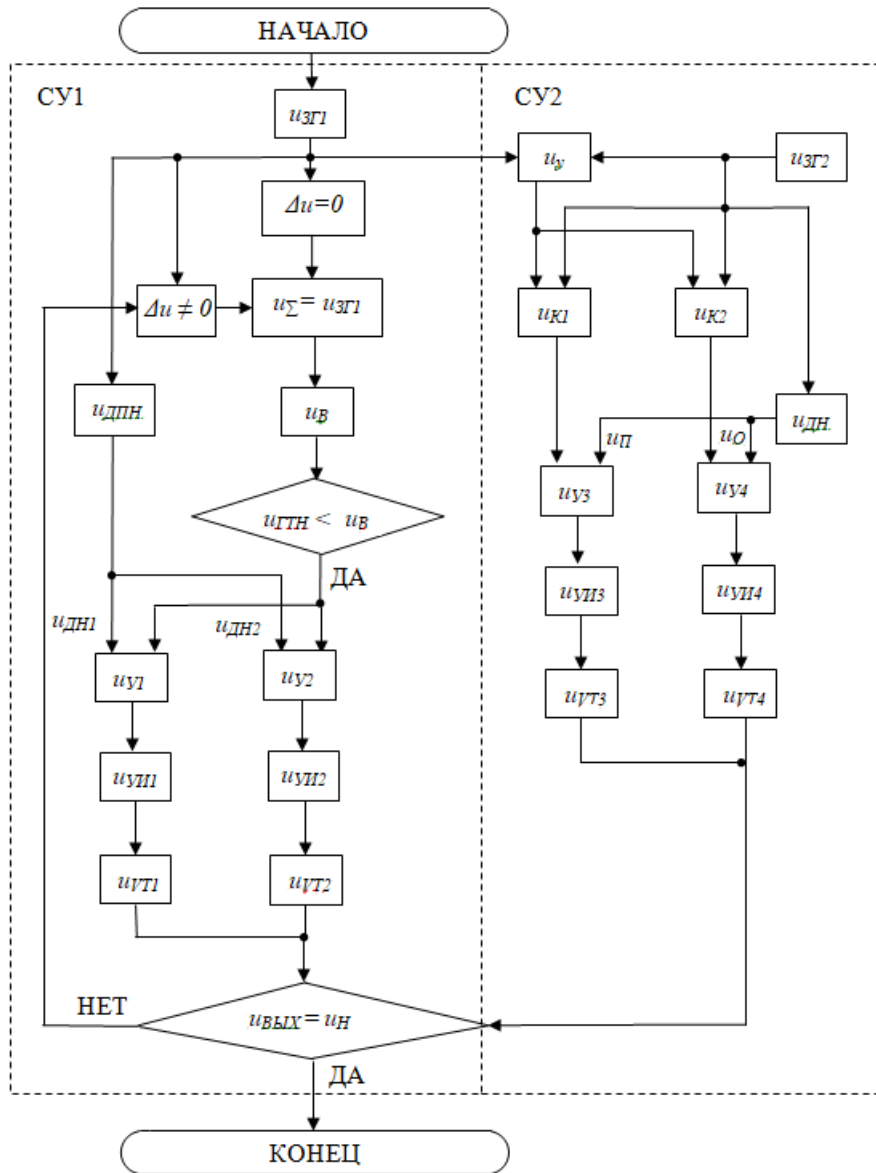


Рисунок 3.2 – Алгоритм работы блоков систем управления СУ1 и СУ2 по преобразованию и стабилизации напряжения

Управляющие импульсы u_{y1} и u_{y2} выхода логических элементов И1 и И2 через усилитель импульсов УИ1 и УИ2, соответственно, открывают поочередно транзисторы VT1 и VT2. В результате с напряжения постоянного тока посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), формируется положительная и отрицательная полуволна синусоидального высокочастотного напряжения u_{11} и u_{12} соответственно (рисунок 3.3, а). Это напряжение прикладывается к первичным обмоткам согласующего трансформатора Т (рисунок 3.1).

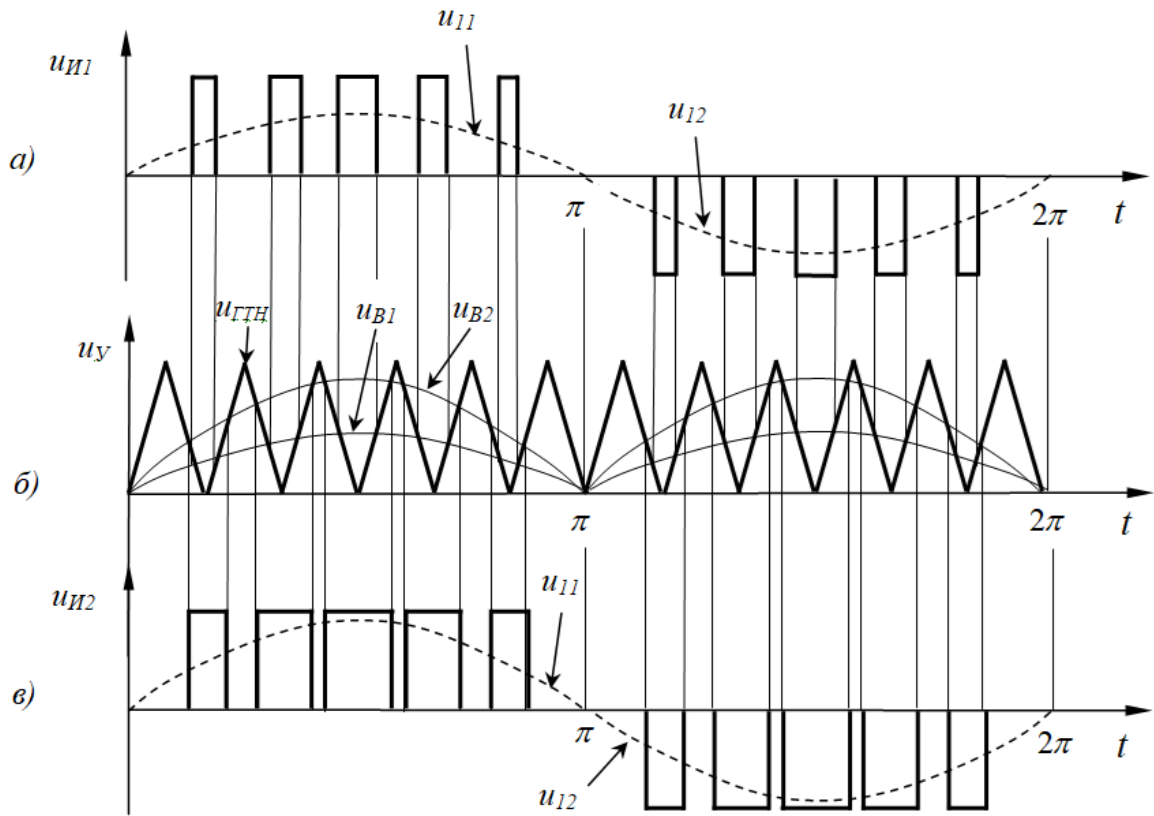


Рисунок 3.3 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы инвертора напряжения

При изменении величины или характера нагрузки блок автоматической системы управления СУ1 стабилизирует напряжение на выходе преобразователя $u_{ВЫХ}$. К примеру, если напряжение $u_{ВЫХ}$ уменьшится, то это приведёт к увеличению напряжения на выходе сумматора С, т.е. $u_{\Sigma} = u_{ЗГ1} + \Delta u$. В результате увеличится выходное напряжение выпрямителя $u_{В2} > u_{В1}$ (рисунок 3.3, б). С учётом условия, что управляющие импульсы формируются когда $u_{ГТН} < u_{В2}$, то увеличится ширина модулирующих импульсов (рисунок 3.3, в) и амплитуда напряжений $u_{И1}$ и $u_{И2}$ на первичных обмотках согласующего трансформатора Т (рисунок 3.1). В результате увеличится значение выходного напряжения $u_{ВЫХ}$ преобразователя.

Принцип работы блока автоматической системы управления реверсивным выпрямителем СУ2 по преобразованию высокочастотного напряжения переменного тока в напряжение пониженной частоты. Задающий генератор ЗГ2 формирует синусоидальный сигнал $u_{ЗГ2}$ пониженной частоты, требуемый для нагрузки (рисунок 3.4, а). Этот сигнал поступает на второй вход блока синхронизации БС

(рисунок 3.1). При выполнении условия когда $u_{3Г2} < u_{3Г1}$ на выходе блока синхронизации БС формируются управления импульсы u_V (рисунок 3.4, б), которые поступают на первые входы компараторов К1 и К2 (рисунок 3.1). Длительность импульсов на выходе компараторов $u_{К1}$ и $u_{К2}$ зависит от отношения амплитуды напряжений задающих генераторов ЗГ1 и ЗГ2, т.е. от $u_{3Г1} / u_{3Г2}$ (рисунок 3.4, в). Управляющие импульсы $u_{К1}$ и $u_{К2}$ с компараторов К1 и К2 поступают на первые входы логических элементов И3 и И4. Логический элемент И3 срабатывает, когда на второй его вход поступает сигнал о положительной полярности $u_{П}$ напряжения $u_{3Г2}$, а логический элемент И4 срабатывает когда на второй его вход поступает сигнал $u_{О}$ об отрицательной полярности напряжения $u_{3Г2}$. Сигналы о полярности напряжения $u_{3Г2}$ поступают от датчика полярности напряжения ДПН2 (рисунок 3.1). Управляющие импульсы $u_{У3}$ и $u_{У4}$ от логических элементов И1 и И2 через усилители импульсов УИ3 и УИ4 соответственно поступают на управляющие электроды транзисторов VT3 и VT4. В результате срабатывания этих транзисторов из участков высокочастотного напряжения на выходе преобразователя формируется синусоидальное напряжение низкой частоты $u_{ВЫХ}$ (рисунок 3.4, г).

Выходной фильтр, выполненный на дросселе L_{Φ} и конденсаторе C_{Φ} , подавляет амплитуды напряжений высших гармоник, т.е. обеспечивает требуемое качество выходного напряжения $u_{ВЫХ}$, которое формируется из участков высокочастотного напряжения (рисунок 3.4, г).

Таким образом, поочередная работа транзисторов VT1 и VT2 обеспечивает преобразование напряжения постоянного тока в высокочастотное синусоидальное напряжение по средствам СУ1. Кроме того блок автоматической системы управления СУ1 осуществляет стабилизацию напряжения при его изменениях. Реверсивный выпрямитель, выполненный транзисторах VT3 и VT4 преобразует высокочастотное напряжение в напряжение с промышленной частотой тока по средствам блока автоматической системы управления СУ2.

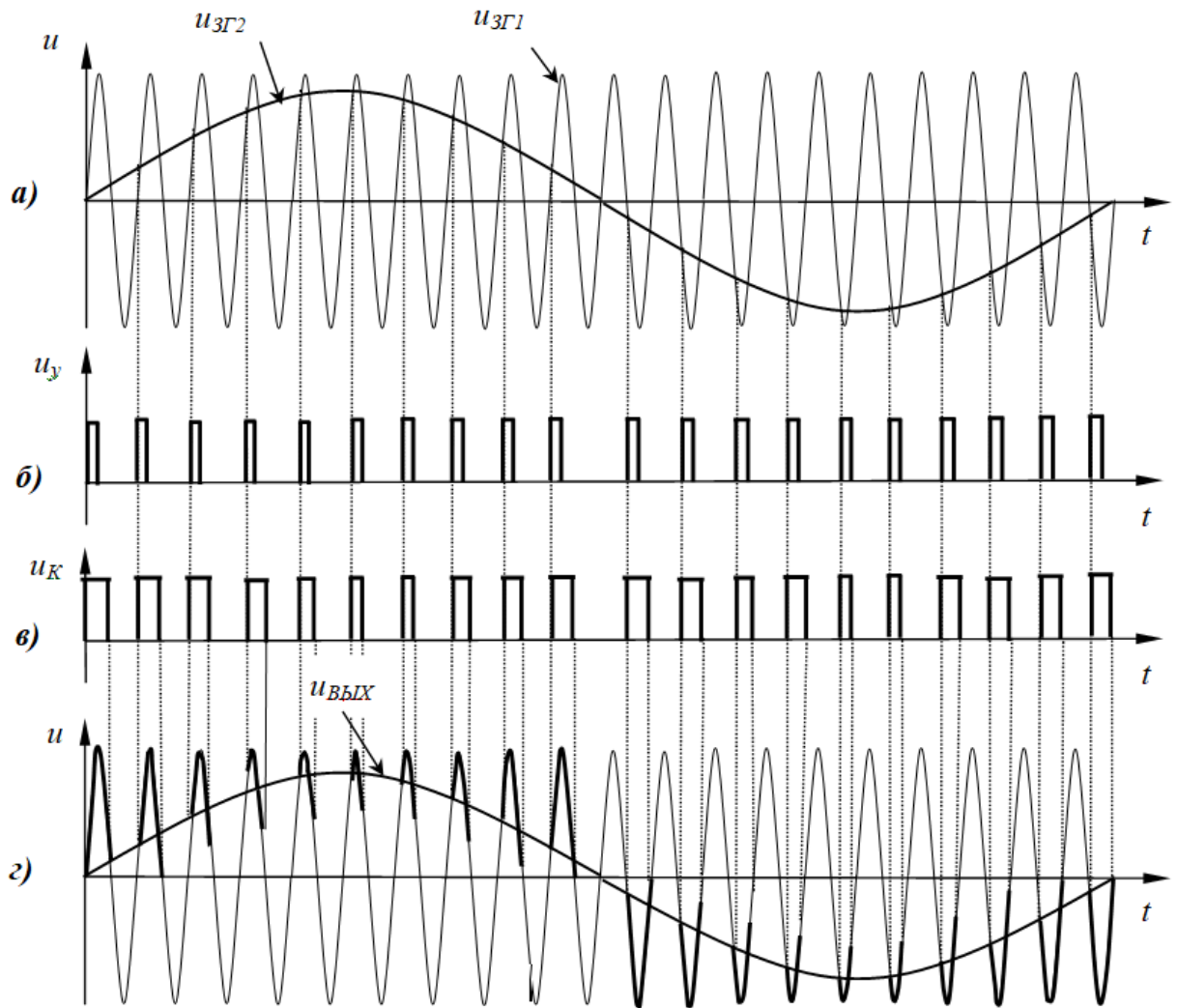


Рисунок 3.4 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы реверсивного выпрямителя

3.2 Разработка принципиальной электрической схемы

На рисунке 3.5 приведена принципиальная электрическая схема преобразователя напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока, выполненная на базе высокочастотного инвертора и реверсивного выпрямителя (см. рисунок 3.1).

На вход инвертора подается напряжение постоянного тока, вырабатываемое группой солнечных батарей. В зависимости от схемы соединения панелей, входное напряжение может быть различного уровня – 12 В, 24 В, 36 В или 48 В. По-

стоянное напряжение поступает на входной фильтр $\Phi_{вх}$, где происходит его предварительная фильтрация и сглаживание.

Первое звено преобразования энергии собрано на транзисторах VT1, VT2 и трансформаторе T1. На этом этапе входное постоянное напряжение преобразуется в высокочастотное переменное напряжение с высокой амплитудой. Каждый из транзисторов нагружен на свою половину первичной обмотки высокочастотного трансформатора T1, при этом обмотки трансформатора включены встречно и имеют общую точку соединения.

Управление транзисторами первого звена осуществляется по принципу широтно-импульсной модуляции. Такое управление характеризуется периодом модуляции, внутри которого первичные обмотки трансформатора T1 подключаются поочередно к входному напряжению при помощи транзисторов VT1 и VT2. Таким образом, форма кривой напряжения после транзисторов представляет собой высокочастотную двухтактную последовательность прямоугольных импульсов (рисунок 3.6).

Для уменьшения потерь в схеме применяются полевые транзисторы N-типа с низким сопротивлением открытого канала марки IRFB4321. Для защиты транзисторов от выбросов напряжений самоиндукции обмоток трансформатора применены диоды VD6 и VD7. Несмотря на то, что выбранные транзисторы уже имеют защитный встроенный диод, данная мера позволяет повысить общую надежность работы схемы.

Управление транзисторами VT1 и VT2 осуществляется при помощи 8-разрядного микроконтроллера DD1 типа PIC16F1847. Модуляция управляющих сигналов ШИМ по синусоидальному закону реализуется программным способом при помощи прописанных табличных данных. Высокая частота работы микроконтроллера позволяет реализовать данную задачу с малым шагом и высокой точностью.

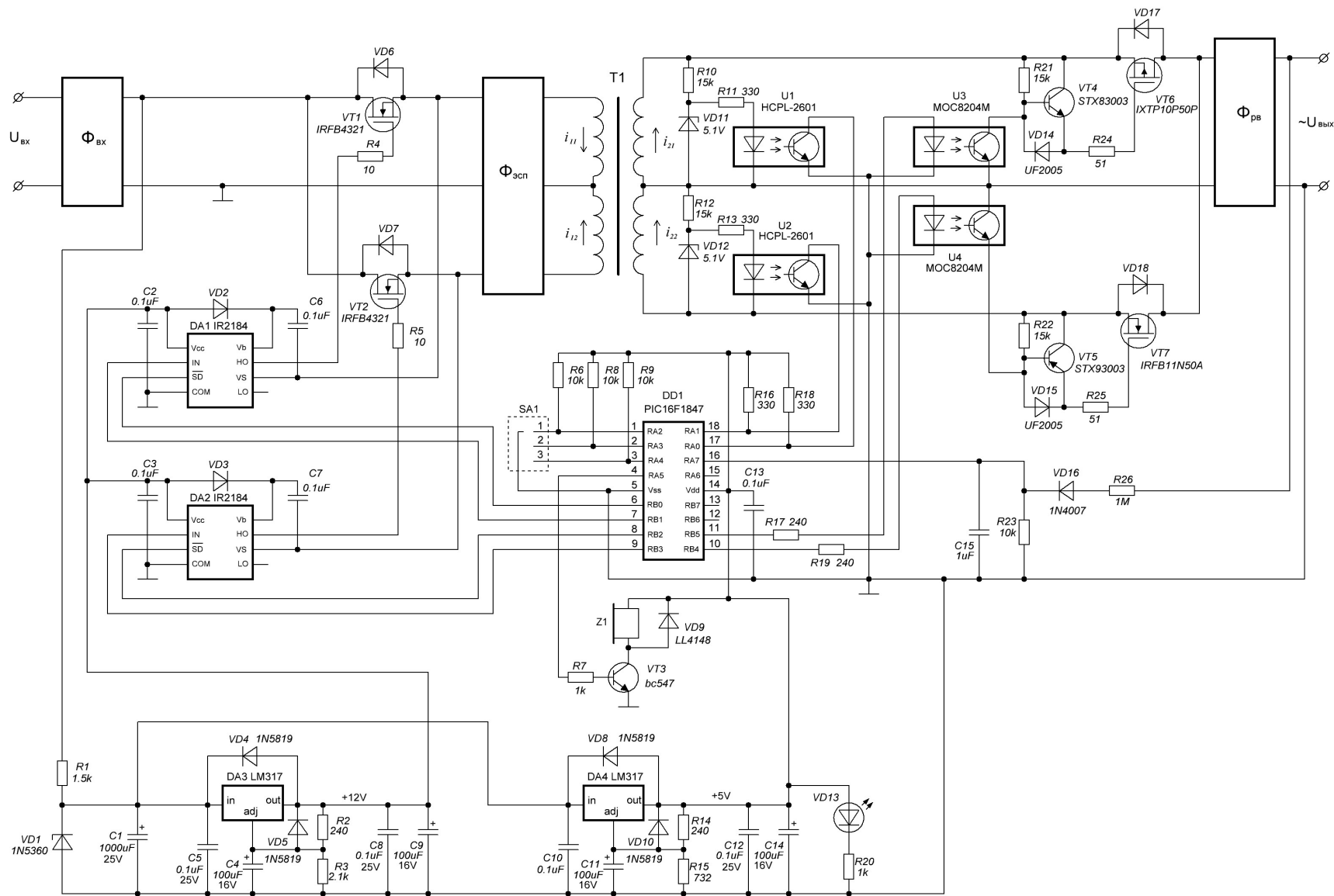


Рисунок 3.5 – Принципиальная электрическая схема инвертора

Из-за того, что транзисторы VT1 и VT2 имеют высокую входную емкость, осуществить их прямое управление при помощи микроконтроллера не представляется возможным из-за высокой частоты переключения. Выводы используемого микроконтроллера слаботочные и не позволяют эффективно управлять таким типом транзисторов на частоте работы ШИМ. Поэтому в схеме применены специализированные микросхемы-драйверы DA1 и DA2 типа IR2184, позволяющие решить данную задачу. Ввиду особенности включения транзисторов VT1 и VT2 (в разрыв положительного вывода питания), для каждого из них применяется отдельная микросхема-драйвер с управляющим выводом HO, а выводы LO остаются незадействованными. При помощи данного решения микроконтроллер может эффективно управлять переключением транзисторов даже на высоких частотах.

При помощи трансформатора T1 высокочастотное синусоидальное напряжение повышается до амплитуды порядка 350 вольт на каждой из вторичных обмоток. Вторичные обмотки трансформатора включены с общей средней точкой, при этом на каждой из обмоток выделяется своя полуволна синусоидального напряжения. В разрыв каждой из обмоток включены силовые высоковольтные транзисторы VT6 и VT7, на которых собрано второе звено преобразования энергии. При помощи транзистора верхнего плеча VT6 (P-типа) осуществляется преобразование положительной полуволны синусоидального напряжения, а при помощи транзистора нижнего плеча VT7 (N-типа) осуществляется преобразование отрицательной полуволны синусоидального напряжения. Транзисторы VT6 и VT7 работают в ключевом режиме и на каждой полуволне высокочастотного напряжения включаются и выключаются в определенные моменты времени таким образом, чтобы через них проходила только часть полуволны со “срезанной” вершиной. Площадь полуволны, проходящей через транзистор, изменяется в каждом периоде, а эти изменения, в свою очередь, модулированы по синусоидальному закону с целью получения стандартной частоты 50 Гц и среднеквадратичного напряжения 220 В. Таким образом, после прохождения этого напряжения через выходной фильтр $\Phi_{рв}$, на выходе получается форма напряжения, соответствующая

стандартной сетевой ($U_{\text{вых}}$), после чего данное напряжение поступает к потребителю.

Ввиду того, что силовые транзисторы VT6 и VT7 работают в разных участках высоковольтной схемы, применить микросхему-драйвер для их управления не представляется возможным, так как в данном случае не будет обеспечена требуемая гальваническая развязка от управляющего микроконтроллера. Для решения этой задачи в положительном и отрицательном плече схемы используются высоковольтные транзисторные оптопары U3 и U4 типа MOC8204M. При помощи данных оптопар затворы транзисторов в обоих плечах подключаются к открывающему напряжению, а микроконтроллер DD1 может управлять их работой, оставаясь гальванически отвязанным от цепей силовых транзисторов. Для эффективного закрывания силовых транзисторов применяются цепи, построенные на транзисторах VT4 и VT5, что позволяет справляться с высокой емкостью силовых транзисторов, снижая их время закрывания и значительно уменьшая потери при переключении. При этом диоды VD14 и VD15 служат для защиты транзисторов VT4 и VT5 в моменты переключения.

Принцип управления транзисторами VT6 и VT7 для получения итоговой формы выходного напряжения подразумевает 2 способа реализации. Первый способ – применение аналого-цифрового преобразователя, анализирующего уровень высокочастотного напряжения и позволяющий определять временные точки включения и отключения силовых транзисторов. Реализация такого способа является очень сложной по нескольким причинам, прежде всего из-за необходимости наличия высокоскоростного АЦП и возможности передачи этих данных по гальванически развязанному интерфейсу. Поэтому с точки зрения целесообразности применить данный способ не представляется возможным. Второй способ – применение фазового управления транзисторами VT6 и VT7. Для его реализации необходимо знать момент перехода высокочастотного синусоидального напряжения через ноль и, в зависимости от текущего момента времени, изменять углы включения и отключения транзисторов с целью получения требуемой модулиро-

ванной синусоидальной формы выходного напряжения. Такой способ более прост в реализации и применяется в данной работе.

Для определения момента перехода высокочастотного синусоидального напряжения через ноль применены детекторы, основанные на высокоскоростных оптронах U1 и U2 типа HCPL-2601. В каждой из плеч схемы применен свой датчик, что позволяет повысить точность и исключить влияние разброса параметров элементов схемы для каждой полуволны напряжения. Для ограничения напряжения при работе оптронов служат цепи R10, VD11 и R12, VD12, а для ограничения токов, протекающих через светодиоды оптронов, применены резисторы R11 и R13. Приемные части оптронов подключены к входам микроконтроллера DD1 при помощи подтягивающих резисторов R16 и R18. Таким образом, контроль и управление осуществляется по каждой полуволне высокочастотного напряжения. В каждом периоде синусоидального напряжения микроконтроллер использует свои значения фазового сдвига $\alpha_{\text{выкл}}$ и $\alpha_{\text{вкл}}$ для выключения и включения силового транзистора плеча с целью получения требуемого модулированного выходного напряжения (рисунок 3.6).

Для получения необходимой точности, изменение фазовых сдвигов осуществляется с 10-битным разрешением, что позволяет модулировать выходное синусоидальное напряжение с высокими параметрами.

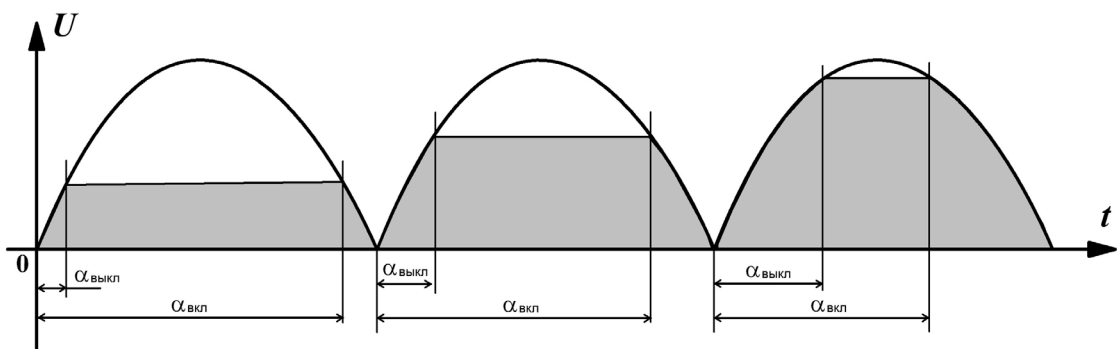


Рисунок 3.6 – Принцип фазового управления транзисторами второго звена преобразования энергии

Для реализации требуемых интервалов времени используется внутренний таймер микроконтроллера, позволяющий задавать нужные значения задержек без необходимости написания кода программы для каждой из них.

Для стабилизации выходного напряжения инвертора используется цепь обратной связи, реализованная на элементах VD16, R23, R26 и C15. В данную цепь входит выпрямитель выходного напряжения, делитель и фильтр первого порядка. Таким образом, выходное напряжение выпрямляется, уменьшается до необходимого уровня и сглаживается. Полученное напряжение подается на внутренний аналого-цифровой преобразователь микроконтроллера (вывод 16). В случае выхода напряжения за заданные рамки, микроконтроллер изменяет параметры работы звена фазового управления выходными транзисторами таким образом, чтобы выходное напряжение оставалось на требуемом уровне.

Для питания микроконтроллера используется компенсационный стабилизатор напряжения, собранный на интегральной схеме DA4 типа LM317, включенной по типовой схеме. Выходное напряжение стабилизатора задается резисторами R14 и R15 и составляет 5 В. Для питания микросхем-драйверов используется стабилизатор напряжения, собранный на интегральной схеме DA3, при этом выходное напряжение данного узла составляет 12 В. Входное напряжение для обоих стабилизаторов формируется при помощи цепи R1 и VD1, представляющей собой предварительный балластный ограничитель напряжения. Так как входное напряжение инвертора может изменяться в широких пределах, данная цепь предотвращает появление слишком высокого напряжения на входах стабилизаторов, ограничивая его на уровне 25 В. Так как цепи управления потребляют незначительные токи, применение данной цепи практически не влияет на общий высокий КПД инвертора.

Светодиод VD13 служит индикатором включения питания. Для звуковой индикации работы инвертора в различных режимах применяется излучатель Z1, работой которого управляет микроконтроллер через транзистор VT3. Для переключения режимов работы инвертора используется переключатель SA1 на три положения. Контакты переключателя подключены к входам микроконтроллера при помощи подтягивающих резисторов R6, R8 и R9. Выводы 12, 13 и 15 микроконтроллера DD1 являются резервными и могут быть использованы в дальнейшем для расширения возможностей инвертора. Так как все силовые транзисторы

разработанного инвертора работают в ключевом режиме, общий КПД схемы имеет высокий уровень, а применение микроконтроллера позволяет гибко изменять основные параметры прибора программным методом, без необходимости изменения номиналов электрической схемы.

3.3 Разработка компьютерной модели инвертора

Важным является вопрос исследования работы в разных режимах функционирования системы инвертора (рисунок 3.1). Эффективным средством сегодня является моделирование физических процессов с использованием специальных прикладных программ (Comsol, MathLAB, SimInTech) [17, 103]. Эти программы позволяют создавать достаточно сложные имитационные компьютерные модели. Моделирование в SimInTech позволяет создать компьютерную модель (КМ) из стандартных блоков, имеющих в библиотеке в виде принципиальной электрической схемы.

Принятые допущения при моделировании:

- силовые электронные приборы идеальные, т. е. коммутация происходит мгновенно;
- источник напряжения идеальный;
- нагрузка пассивная R и R-L;
- кратность (отношение) частот опорного и модулирующего сигналов K_p стремится к бесконечности;
- у трансформатора отсутствуют потери энергии на нагрев обмоток и потоки рассеяния обмоток, поступающая энергия равна преобразованной энергии, а при трансформации не вносятся никаких искажений формы напряжения.

ИКМ инвертора построена на IGBT транзисторах и представляет из себя в общем виде 1-фазный полумостовой инвертор с ШИМ управлением. В библиотеке SimInTech имеется блок «IGBT транзистор» с параллельно включенным обратным диодом, который описывается моделью, общая структура которой представ-

лена на рисунке 3.7, где:

u_{ak} – значение напряжения на элементе;

C – значение управляющего сигнала;

R – сопротивление элемента;

U_f – заданное в свойствах блока падение напряжения в прямом направлении, В.

Реализуемые ВАХ силовых электронных приборов определяются выражениями:

$R = R_{on}$, если $u_{ak} \geq u_f$ и $C > 0$;

$R = \infty$, если $u_{ak} < u_f$ или $C < 0$.

Блок управления реализует совмещенную ВАХ IGBT транзистора и диода, включенного параллельно транзистору в обратном направлении

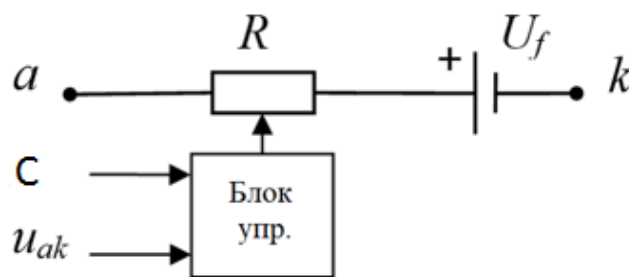


Рисунок 3.7 – Структура модели IGBT транзистора с параллельно включенным обратным диодом

В зависимости от свойства «Вид снаббера» параллельно полупроводниковому элементу включена R-цепь или RC-цепь. За положительное направление тока элемента (ток определяется с учетом снаббера) принято направление от порта «1» к порту «2». Общий вид разработанной КМ инвертора с использованием схемы, приведённой на рисунок 3.1, показана на рисунке 3.8.

Для управления IGBT транзисторов VT1-VT2 используются блоки формируя драйвер: «синусоида» G1-G2 для задания несущей частоты и начальной фазы; «шим несимметричный» PWM1-2 преобразует сигнал на входе в ШИМ сигнал и позволяет задавать коэффициент заполнения; «знак» S1-S2 преобразует входной сигнал в электрический сигнал управления.

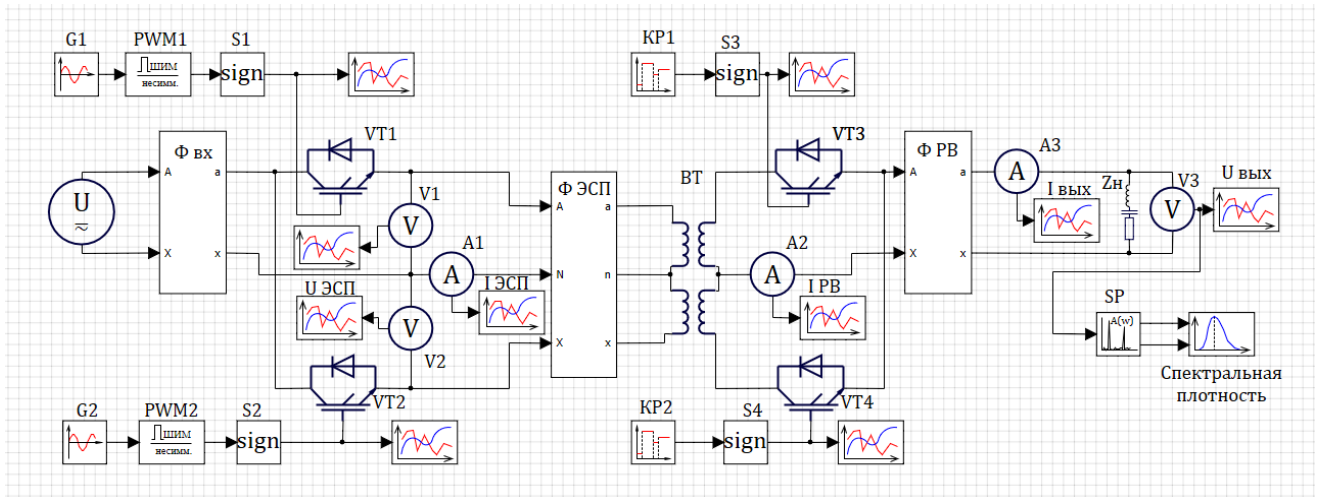


Рисунок 3.8 – Компьютерная модель инвертора
(модель выполнена в программе SimInTech)

Таким образом, формируется ШИМ сигнал управления IGBT транзисторами VT1-VT2 (рисунок 3.9).

Блок «источник напряжения» U позволяет задавать входное напряжение. Входной сглаживающий Г-образный индуктивно-ёмкостной фильтр $\Phi_{ВХ}$ представлен в виде субблока схема которого изображена на рисунке 3.10 необходим для уменьшения количества пульсации от напряжения источника U .

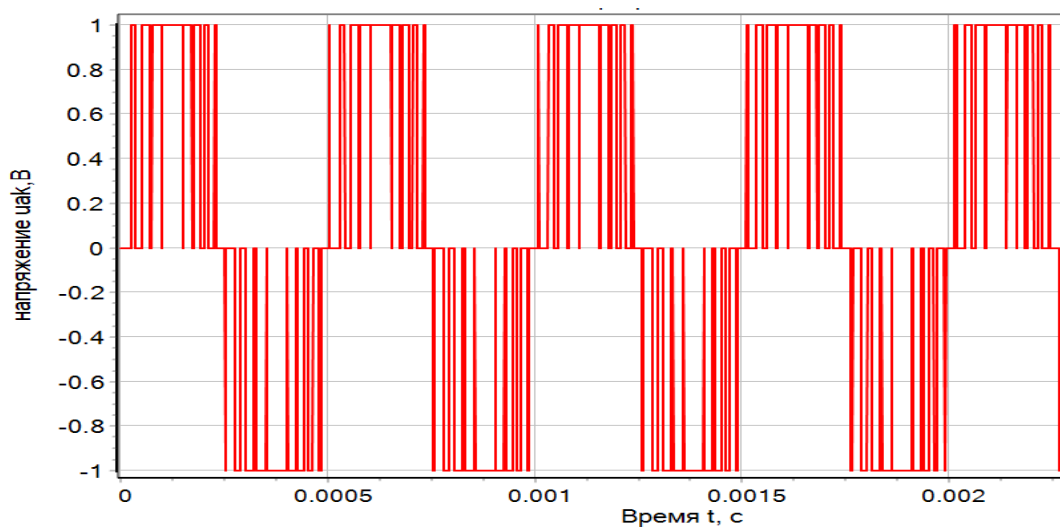


Рисунок 3.9 – ШИМ сигнал управления IGBT транзисторами VT1-VT2
(для примера несущая частота выбрана 2 кГц)

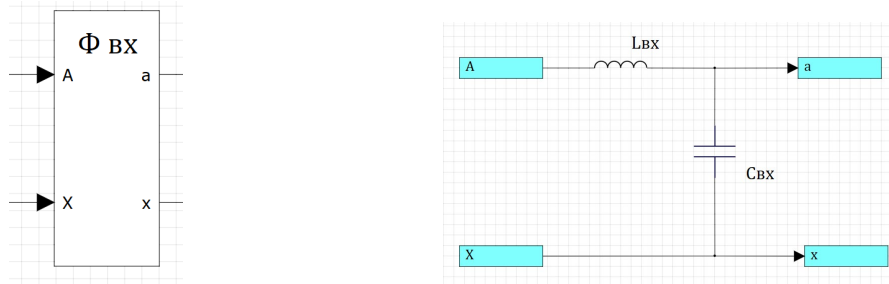


Рисунок 3.10 – Схема сглаживающего Г-образного индуктивно-ёмкостного фильтра $\Phi_{ВХ}$

Поочередная работа полупроводниковых ключей VT1-VT2 формирует напряжение в виде однополярного ШИМ, который будет существенно исказить гармонический состав напряжения при преобразовании трансформатором ВТ. Поэтому для получения синусоидального напряжения в модели предусмотрен сглаживающий Г-образный индуктивно-ёмкостной фильтр $\Phi_{ЭСП}$, схема которого приведена на рисунке 3.11.

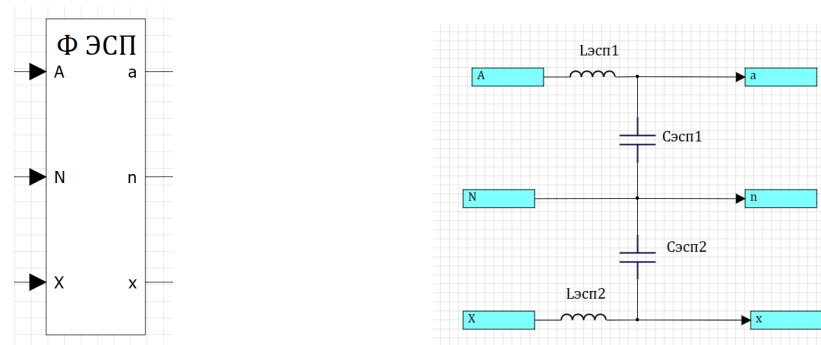


Рисунок 3.11 – Схема сглаживающего Г-образного индуктивно-ёмкостного фильтра $\Phi_{ЭСП}$

Двухтактный трансформатор ВТ в КМ реализуется двумя блоками («идеальный однофазный двухобмоточный трансформатор»). Отношения первичных напряжения u_1 и тока i_1 , приложенных к трансформатору, ко вторичным u_2 и i_2 , на выходе трансформатора, определяются выражениями:

$$u_1 = k_{TP} u_2, \quad (3.1)$$

$$i_2 = k_{TP} i_1, \quad (3.2)$$

где k_{TP} – заданный в свойствах блока коэффициент трансформации.

Для модулирования выходного синусоидального напряжения трансформатора ВТ меньшей частоты в КМ предусмотрено импульсное управление IGBT

транзисторов VT3-VT4, которое реализуется блоками – «кусочно-постоянная» (задается время открытия электронного ключа и продолжительность импульса) и «знак» преобразует математический сигнал в электрический. Форма сигнала управления IGBT транзистором VT3 приведена на рисунке 3.12. При этом форма положительной волны имеет вид, изображенный на рисунке 3.13. КМ позволяет регулировать открытие электронных ключей VT3-VT4 и изменять количество импульсов ШИМ и паузу между ними, что будет влиять на форму выходного напряжения инвертора.

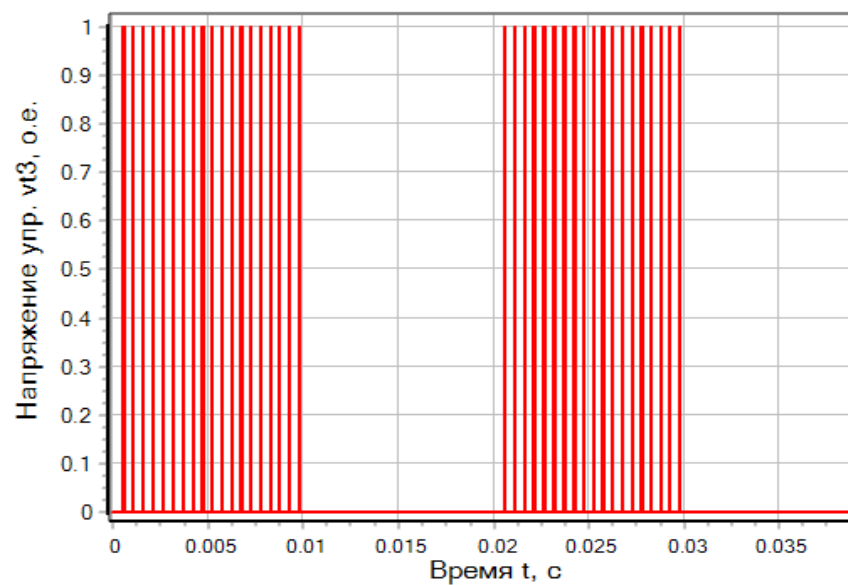


Рисунок 3.12 – Форма сигнала управления IGBT транзистором VT3 (формируемая частота 50 Гц)

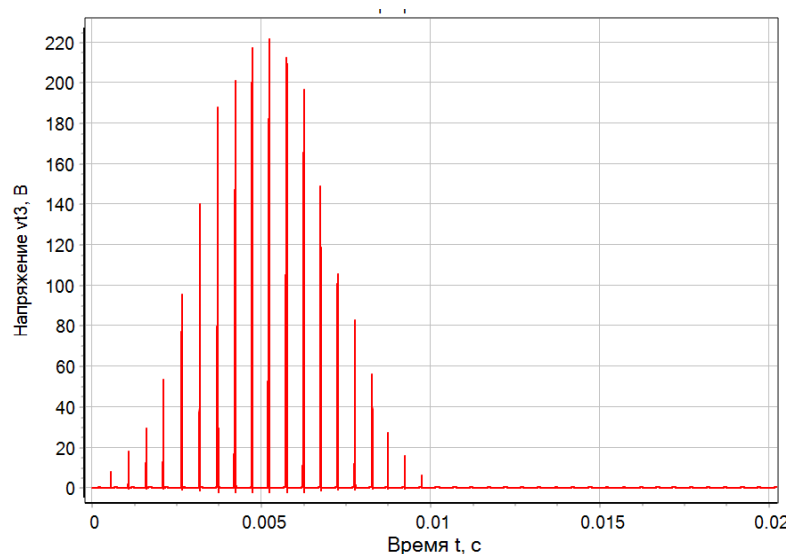


Рисунок 3.13 – Форма положительной волны напряжения IGBT транзистора VT3 (формируемая частота 50 Гц)

Для получения синусоидальной формы выходного напряжения в КМ предусмотрен сглаживающий Г-образный индуктивно-ёмкостной фильтр $\Phi_{рв}$, принципиальная схема субблока представлена на рисунке 3.14, а форма выходного напряжения на рисунке 3.15.

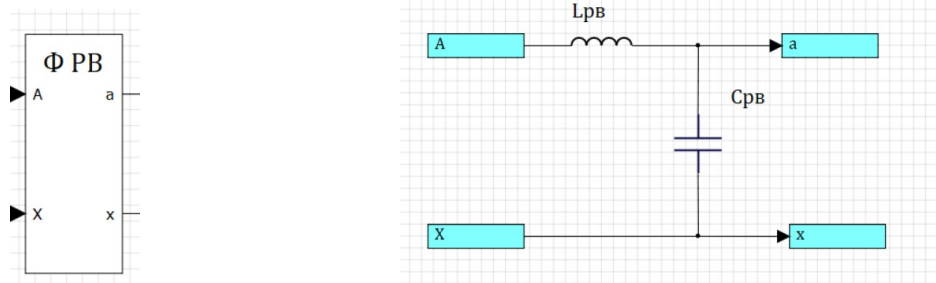


Рисунок 3.14 – Схема сглаживающего Г-образного индуктивно-ёмкостного фильтра $\Phi_{рв}$

Оценить искажения выходного напряжения позволяет блок «спектральная плотность» SP, который реализует вычисление спектральной плотности скалярного входного сигнала. Методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) вычисляется дискретное преобразование Фурье последовательности определяемое по формуле

$$X(f, T) = \Delta t \left(\sum_{n=1}^{N-1} x_n \cdot e^{\frac{-i2\pi fn}{N}} \right). \quad (3.3)$$

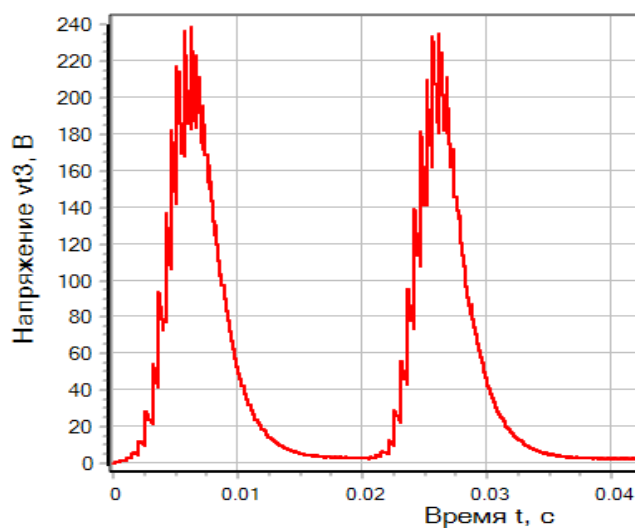


Рисунок 3.15 – Форма положительной волны выходного напряжения (формируемая частота 50 Гц)

Абсолютная спектральная плотность определяется по формуле

$$\varepsilon_k = \frac{2\Delta t}{N\zeta} X_k, \quad (3.4)$$

где Δt – период дискретизации сигнала;

ζ – коэффициент, зависящий от способа взвешивания входной величины;

X_k – значение дискретного преобразования Фурье на k -й гармонике.

Спектр амплитуд выходного напряжения, приведённого на рисунке 3.15 представлен на рисунке 3.16. Спектральная плотность показывает существенное наличие гармоник напряжения – 2-я 20,2%, 3-я 10,4%, 4-я 4,3 %, 5-я 2,1% 6-я 0,9% 7-я 0,12 % и т. д.

Для получения выходного напряжения, отвечающего требованиям качества электроэнергии необходимо произвести настройку блоков ИКМ. В КМ рассматриваются IGBT транзисторы VT1-4 с сопротивлением в прямом направлении 0,01 Ом, падение напряжения в прямом направлении 0,7 В, сопротивление снаббера 500 кОм. Для управления полупроводниковых ключей в блоке G1 задается несущая частота 2000 Гц (в виде $2 \cdot \pi \cdot 2000$) и амплитудой управляющего сигнала 1 В.

Блок «шим несимметричный» PWM1-2 преобразует сигнал в ШИМ, для формирования 9 импульсов со скважностью 1,09 в блоке задан период дискретности 0,00002515 с.

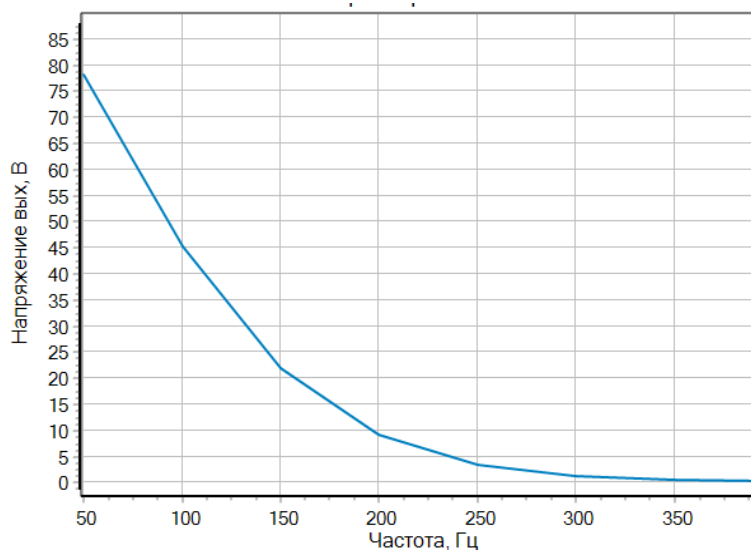


Рисунок 3.16 – Спектральная плотность выходного напряжения

Сглаживающий Г-образный индуктивно-ёмкостной фильтр $\Phi_{рв}$ состоит из конденсатора емкостью 7 мкФ и катушки индуктивностью 0,5 мГн. Сглаживающий фильтр $\Phi_{эсп}$ формирует из ШИМ напряжения в синусоидальное и содержит два конденсатора емкостью 12 мкФ и две катушки индуктивностью 0,5 мГн, которое подается на автотрансформатор ВТ состоящий из двух идеальных трансформаторов с коэффициентом трансформации 0,19. Повышенное напряжение преобразуется IGBT транзисторами VT3 и VT4, которые управляются блоками КР1-2, сигнал управления, которого изображен на рисунке 4.6, для повышения качества выходного напряжения скважность увеличена до 2,8. На рисунке 4.9 видно наличие большого количество гармонических составляющих напряжения, поэтому емкость конденсатора выходного сглаживающего Г-образного индуктивно-ёмкостного фильтра $\Phi_{рв}$ увеличена до 120 мкФ, индуктивность катушки 0,15 мГн. Входное напряжение 48 В на источнике напряжения U с внутренним сопротивлением 0,008 Ом. Модулированное выходное напряжение инвертора и частотный спектр приведен на рисунке 3.17.

Для удобства действующее значение напряжения (рисунок 3.17, а) равно амплитудному, т. е. 217 В, при токе нагрузке 10 А (сопротивление $R_H=22$ Ом). Спектральная плотность (рисунок 3.17, б) показывает наличие допустимых согласно требуемому качеству электроэнергии значения гармонических составляющих напряжения: 2-я 2,7%, 3-я 3,8%, 4-я 0,8 %, 5-я 1,1% 6-я 0,2% 7-я 0,09 % и т. д.

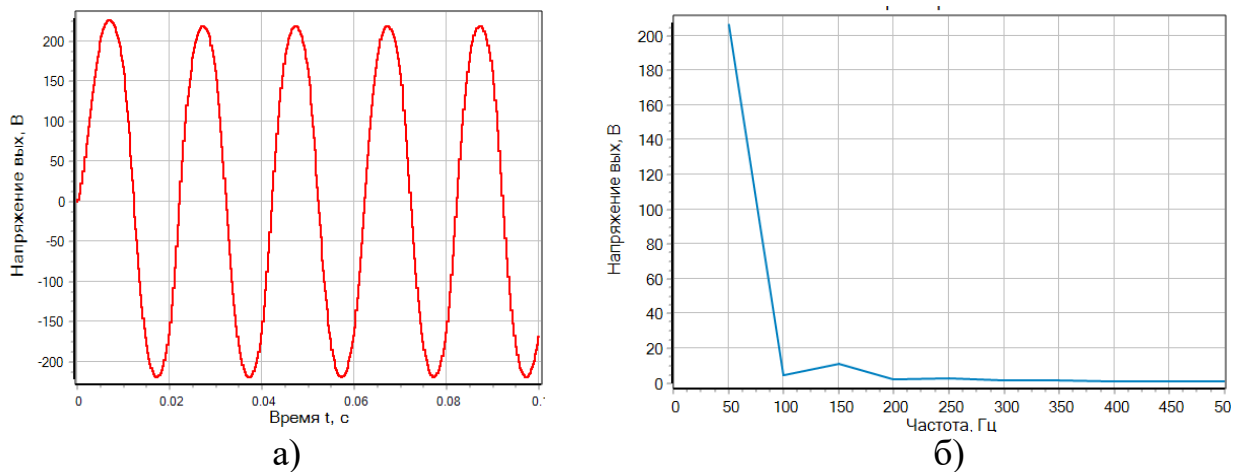


Рисунок 3.17 — Выходное напряжение инвертора (а) и спектральная плотность выходного напряжения (б)

Таким образом, КМ позволяет изменять: входное напряжение источником напряжения U , количество импульсов ШИМ и паузу между ними блоками PWM1-2. Оценка гармонического состава выходного напряжения реализуется блоком SP. Для построения регулировочной характеристики в ИКМ необходимо изменять период дискретности в блоках PWM1-2 и частоту в блоках G1-2, и снимать выходное напряжение вольтметром V3. Снятие внешней характеристики ИКМ происходит за счет изменения нагрузки Z_n , выходное напряжение фиксируется аналогично регулировочной характеристики.

3.4 Выводы

Разработана функциональная схема инвертора, содержащая непосредственно высокочастотный инвертор и реверсивный выпрямитель. Раскрыты особенности её работы по преобразованию и стабилизации напряжения. Приведён алгоритм работы системы управления инвертором по стабилизации напряжения, на базе которого может быть создана программа для прошивки микропроцессора. Частота промежуточного преобразования находится в пределах 1,5–2 кГц. Это позволяет уменьшить массу согласующего трансформатора, а применение в силовой схеме минимального количества транзисторов, позволяет упростить систему управления преобразователем и в комплексе повысить надёжность его работы.

Получена принципиальная электрическая схема системы управления инвертора выполнена на основе 8-разрядного микроконтроллера типа PIC16F1847, позволяет работать с малым шагом и высокой точностью.

Для исследования работы инвертора в разных режимах его функционирования разработана компьютерная модель в программе SimInTech. Компьютерная модель позволяет изменять: входное напряжение источником напряжения, количество импульсов ШИМ и паузу между ними, проводить оценку гармонического состава выходного напряжения, в том числе в разных режимах работы преобразователя, получать регулировочные и внешние характеристики. Качество выходного

напряжения оценивалась по спектральной плотности гармонического состава: в номинальном режиме работы содержание высших составляющих гармоник в процентном отношении к первой гармонике следующее – 2-я 2,7%, 3-я 3,8%, 4-я 0,8 %, 5-я 1,1% 6-я 0,2% 7-я 0,09 % и т. д.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНВЕРТОРА, ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОБИЛЬНЫХ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

4.1 Методика и результаты экспериментальных исследований

Разработан испытательный стенд (рисунок 4.1) по исследованию работы инвертора с промежуточным высокочастотным звеном (рисунок 3.1).

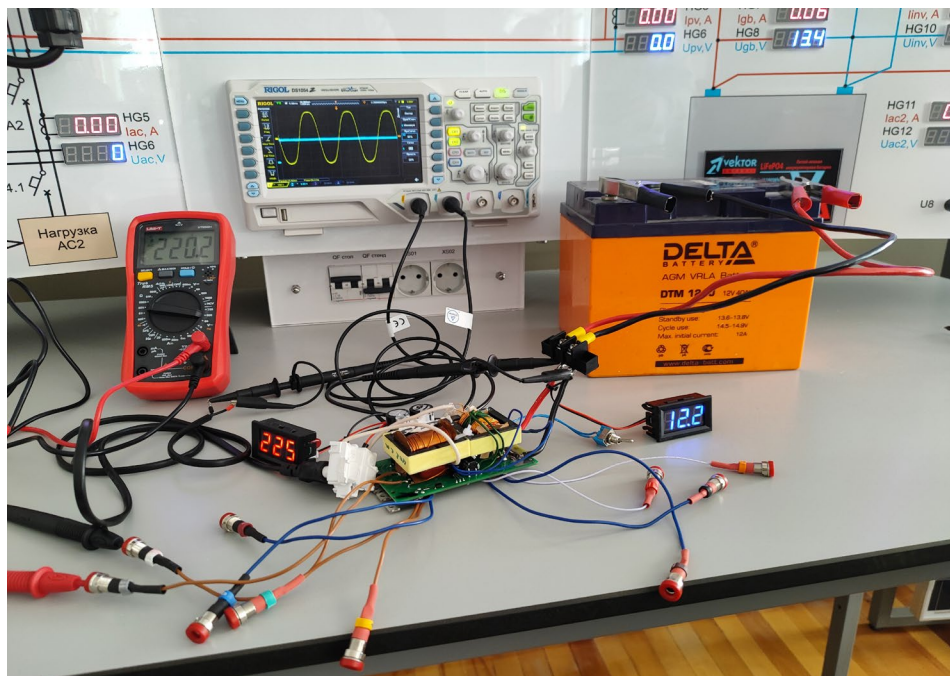


Рисунок 4.1 – Внешний вид испытательного стенда

В состав оборудования стенда:

- осциллограф RIGOL;
- мультиметр, позволяющий измерять величину напряжения постоянного и переменного тока, а также ток;
- аккумуляторная батарея DELTA, применялась, как источник напряжения постоянного тока;

– исследуемый инвертор мощностью 300 Вт размещённый на печатной плате (рисунок 4.2) и собранный согласно схеме, приведённой на рисунке 3.5.

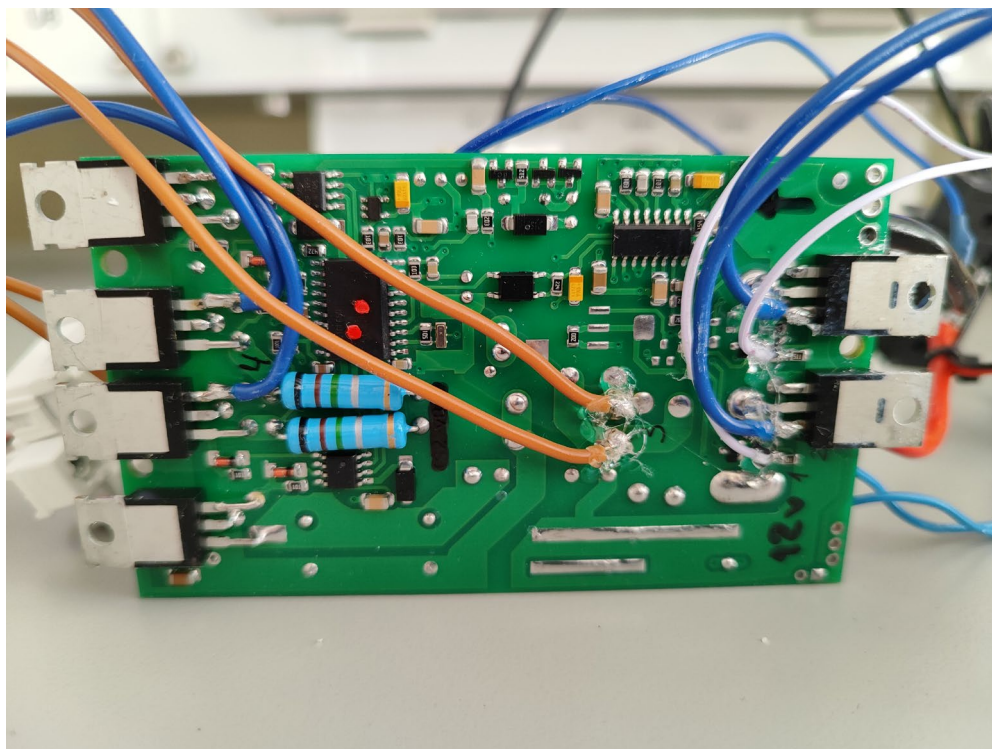


Рисунок 4.2 – Печатная плата силового оборудования и системы управления инвертором

Целью исследования было получение формы силовых сигналов (напряжения и тока) на входе и выходе инвертора, а также сигналов управления высокочастотным инвертором и реверсивным выпрямителем, и сравнение этих сигналов, получаемых с помощью компьютерной модели (рисунок 3.9).

На рисунках 4.3 и 4.4 приведены примеры осциллограмм: сигналы на выходе датчиков полярности напряжения ДПН1 и ДПН2; форма сигналов управления транзисторами VT1 и VT2 инвертора (рисунок 3.1). На экране осциллографа (рисунок 4.1) приведена осциллограмма напряжения на выходе преобразователя.

Для оценки достоверности результатов исследований проводились сравнения результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Оценка проводилась по усредненным значениям рассогласования результатов компьютерного моделирования и результатов экспериментальных исследований. Применялся метод статической оценки точности результатов исследований.

Модель исследования представлялась в виде следующих функций

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= F_1(X), \\ Y_2 &= F_2(X), \\ Y_3 &= F_3(X), \end{aligned} \right\}, \quad (4.1)$$

где Y_1, Y_2, Y_3 – критерии сравнения (напряжение и токи на нагрузке U и I , время длительности переходных процессов t_{mn});

X – управляющее воздействие – мощность нагрузки P , при этом использовались три режима работы на холостом ходу (без подключения нагрузки), при полном подключении нагрузки и включении нагрузки по мощности в два раза меньше P .



Рисунок 4.3 – Форма сигналов датчиков полярности напряжения ДПН1 и ДПН2

Оценка достоверности исследований осуществлялась следующим образом:

- 1) проводились не менее 5 измерений электрических параметров (Y_1, Y_2, Y_3) в разных режимах работы.



Рисунок 4.4 – Форма управляющих сигналов транзисторами VT1 и VT2 инвертора

2) доверительный интервал определялся на основании критерия Стьюдента:

$$\Delta Y = \pm t(\beta, k) \frac{S^*}{\sqrt{k}}, \quad (4.2)$$

где $k = n - 1$; n – число повторных изменений;

$t(\beta, k)$ – критерий Стьюдента;

S^* – приближенное значение средней квадратичной ошибки.

3) Значение квадратичной ошибки определялось по формуле

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}. \quad (4.3)$$

4) Усредненные значения статических данных результатов сравнительного анализа заносились в таблицу 4.1, где отклонения результатов теоретических и экспериментальных исследований определялось в процентах.

В таблице 4.1 введены обозначения: P и $P_H = 300$ Вт – мощность и номинальная мощность; U , I и t_{III} – измеряемые величины напряжение, ток и время пе-

реходного процесса; Δ и Δ_{CP} – отклонение и среднее отклонение из выборки, проведённых измерений, между результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований (ЭИ) и компьютерного моделирования (КМ)

| P | U | | | | I | | | | t_{III} | | | |
|--------------|-------------------------|-----|--------------|-------------------|-------------------------|------|--------------|-------------------|--------------------------|-----|--------------|-------------------|
| | Значения измерений, B | | Δ , % | Δ_{CP} , % | Значения измерений, A | | Δ , % | Δ_{CP} , % | Значения измерений, $мс$ | | Δ , % | Δ_{CP} , % |
| | ЭИ | КМ | | | ЭИ | КМ | | | ЭИ | КМ | | |
| $P = 0$ | 219 | 221 | -1,1 | -0,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 226 | 228 | -0,9 | | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | |
| | 228 | 230 | -0,7 | | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | |
| $P = 0,5P_H$ | 234 | 245 | -4,3 | -3,6 | 0,87 | 0,9 | -3,7 | -3,3 | 119 | 115 | +3,1 | +3,8 |
| | 216 | 223 | -3 | | 1,16 | 1,2 | -3,4 | | 109 | 105 | +3,8 | |
| | 219 | 227 | -3,3 | | 0,58 | 0,6 | -2,8 | | 120 | 115 | +4,1 | |
| | 217 | 225 | -3,6 | | 0,68 | 0,7 | -3,1 | | 106 | 102 | +4,2 | |
| | 207 | 215 | -3,9 | | 1,07 | 1,1 | -3 | | 124 | 119 | +3,9 | |
| | 195 | 203 | -3,8 | | 0,67 | 0,7 | -3,3 | | 110 | 106 | +3,7 | |
| | 202 | 208 | -3,1 | | 0,77 | 0,8 | -4 | | 102 | 98 | +3,5 | |
| $P = P_H$ | 209 | 218 | -3,9 | -3,7 | 1,4 | 1,45 | -3,3 | -4,3 | 118 | 113 | +4 | +3,4 |
| | 190 | 198 | -4,1 | | 1,24 | 1,3 | -4,6 | | 126 | 122 | +2,8 | |
| | 199 | 205 | -3,1 | | 1,36 | 1,42 | -4,3 | | 129 | 124 | +3,6 | |
| | 219 | 227 | -3,5 | | 1,15 | 1,2 | -4,4 | | 123 | 119 | +3,4 | |
| | 207 | 213 | -2,9 | | 1,43 | 1,5 | -4,5 | | 131 | 127 | +3,3 | |
| | 212 | 220 | -3,8 | | 1,14 | 1,2 | -4,7 | | 116 | 112 | +3,2 | |
| | 202 | 211 | -4,4 | | 1,3 | 1,4 | -4,3 | | 125 | 121 | +3,3 | |

Знаки «минус» и «плюс» в таблице 4.1 означают заниженное или завышенное соответственно значение параметра относительно теоретических исследований.

5) Сопоставлялись результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показало, что при измерениях электрических параметров на холостом ходу ($P_H = 0$), при 50 % и 100 % нагрузке средние отклонения для напряжения на выходе преобразователя U изменялось в пределах от $-0,7$ до $-4,4\%$, для тока нагрузки I от $-2,8$ до $-4,7\%$, а для длительности переходных процессов от $+3,1$ до $+4,2$.

Таким образом, сопоставление результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показало следующее: расхождение доверительных границ составляет $\pm 3,8\%$, а расхождение средних значений исследуемых параметров от $-4,4$ до $+4,2\%$. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что проведенные экспериментальные исследования подтверждают достоверность полученных теоретических выводов.

4.2 Способ определения рациональной структуры мобильной энергоустановки на основе экономических и массогабаритных показателей

Важным показателем МВСЭ являются капитальные и эксплуатационные затраты, оценка которых осуществляется, как правило, на этапе проектирования [63, 64].

Целесообразно провести сравнение технико-экономических показателей двух вариантов мобильных электростанций. Первый – проектируемая МВСЭ, а второй, выполненный на базе ДЭС и аккумуляторных батарей. Общим условием для расчёта является сезонный характер нагрузки равный промежутку времени 6 месяцев и автономные потребители потребляют не более 30 кВт·ч энергии в сутки.

Исходными данными расчёта мобильной электростанции по первому варианту являлись экономические показатели функциональных элементов, рассмотренные п. 1.4.

Расчёт капитальных затрат по проектируемому варианту МВСЭ суммарной мощностью источников электроэнергии 4,8 кВт, включая 2,8 кВт мощность ВИЭ, представлены в смете (таблица 4.2). МВСЭ состоит из ВЭУ мощностью 300 Вт, СБ с суммарной мощностью 2500 Вт. В качестве резервных источников применяется бензогенератор мощностью 2 кВт и аккумуляторная батарея емкостью 100 А·ч.

Таблица 4.2 – Сметная стоимость установленного оборудования МВСЭ

| № п/п | Наименование | Цена, руб | Количество | Общая цена, руб |
|-------|---|-----------|------------|-----------------|
| 1 | Роторная ВЭУ YASHEL SV300 | 51274 | 1 | 51274 |
| 2 | Солнечная гибридная монопанель 500 Вт | 17780 | 5 | 88900 |
| 3 | Аккумуляторная батарея модель GX12-100 | 4000 | 1 | 4000 |
| 4 | Инвертор | 20000 | 1 | 20000 |
| 5 | Контроллер PWM 2440 | 4100 | 1 | 4100 |
| 6 | Бензогенератор ПЕСАНТА, 2 кВт | 21430 | 1 | 21430 |
| 7 | Автоприцеп Курганский грузоподъемностью 500 кг | 47270 | 1 | 47270 |
| 8 | Комплекующие, включая каркас разъемы, провода, распределитель и т. п. | 10000 | | 10000 |
| ИТОГО | | | | 246974 |

В составе МВСЭ применяется роторная ВЭУ мощностью 300 Вт (YASHEL WT300), а также солнечные гибридные монопанели каждая мощностью 500 Вт и площадью 2 м². Для обеспечения мощности 2,5 кВт, необходимо 5 таких панелей.

Таким образом, капитальные затраты с учётом проектных и пуско-наладочных работ, которые составляют примерно 30 % от стоимости оборудования (таблица 4.2), на МВСЭ составляют около 246974 руб.

Как известно, эксплуатационные затраты включают в себя затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования. При этом, должны также учитываться затраты на покупку топлива, если в составе станции применяется топливный генератор электроэнергии. В общем случае эксплуатационные затраты на бензогенератор ПЕСАНТА мощностью 2 кВт определяются по формуле [115]:

$$\mathcal{E}_{БГ} = Z_P C_{БГ} + t_{РАБ} C_B P_B, \quad (4.4)$$

где 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 учётом доставки, руб/л;

P_B – расход бензина, л/ч.

Таким образом, если принять, что в сезон бензогенератор работает не более 400 ч., то эксплуатационные затраты на бензоэлектростанцию в сезон составят:

$$\mathcal{E}_{БГ} = 0,025 \cdot 21430 + 400 \cdot 60 \cdot 0,3 = 7736 \text{ руб.}$$

Производители солнечных батарей гарантируют время необслуживаемой работы от 15 лет, ветроэнергетических установок и аккумуляторных батарей от 5 лет. Поэтому при оценке эксплуатационных затрат для рассмотренных источников электроэнергии, как правило, они не учитываются [115].

Таким образом, эксплуатационные затраты на МВСЭ не превышают 10000 руб. в сезон, с учётом обслуживания автоприцепа.

В таблице 4.3 приведена калькуляция технико-экономических показателей проектируемой МВСЭ.

Таблица 4.3 – Техничко-экономические показатели МВСЭ

| № п/п | Статья калькуляции | Сумма, руб |
|---------------|--|------------|
| 1 | Стоимость функциональных элементов (ветроустановка, солнечные модули, инвертор, контроллер, бензоэлектростанция, аккумуляторная батарея) | 189704 |
| 2 | Автоприцеп грузоподъемностью 500 кг | 47270 |
| 3 | Комплекующие изделия | 10000 |
| 4 | Проектные и пусконаладочные работы | 74092 |
| 5 | Эксплуатационные затраты за сезон | 10000 |
| ИТОГО затраты | | 331066 |

Капитальные затраты на мобильную электростанцию, выполненную на базе ДЭС мощностью 5 кВт (средняя стоимость 95 000 руб), содержащую классиче-

ский одноосный автоприцеп (47270 руб.), АБ общей ёмкостью 400 А·ч (16000 руб.) и зарядное устройство (4100 руб.) составляют около 162370 руб.

В сутки ДЭС работает 12 ч, обеспечивая электроэнергией потребителей и зарядку АБ. В остальное, как правило, ночное время источниками электроэнергии для потребителей являются АБ. В этом случае эксплуатационные затраты на мобильную электростанцию, выполненную на базе ДЭС в соответствии с (4.10) составляют:

$$\mathcal{E}_{\text{дэс}} = 0,025 \cdot 95000 + 2160 \cdot 61 \cdot 2 = 265895 \text{ руб.}$$

Таким образом общие затраты, включающие капитальные и эксплуатационные расходы в течение сезона на мобильную электростанцию, выполненную на ДЭС составляют 428265 руб., что на 97199 руб. больше, чем на МВСЭ (таблица 4.3) или в 1,3 раза больше.

Результаты исследований в [115] показали, что если автономные потребители удалены от ТП внешней энергетической системы более чем на один километр, то только капитальные затраты на линию электропередачи и вспомогательное оборудование превышают один млн руб. Таким образом, применение МВСЭ для электроснабжения потребителей электроэнергии МФХ, удаленных от внешней энергетической системы, более чем на один километр, с экономической точки зрения более выгодно.

Основные проблемы разработки мобильных электростанций (МЭС) связаны, прежде всего, в определении их рациональной структуры, в свою очередь рациональная структура станции зависит от параметров оценки её эффективности. К этим параметрам, прежде всего, относятся технико-экономические показатели, а для мобильных станций, кроме того, массогабаритные показатели [76, 105, 115].

Одним из простых способов выбора рациональной структуры автономных систем электроснабжения является оптимизация по одному критерию. К примеру, по экономическим показателям. Наилучшим вариантом является структура системы электроснабжения, имеющая самые низкие значения капитальных и (или) эксплуатационных затрат [115].

Выбор рациональной структуры МЭС по нескольким показателям более сложная задача она состоит в поиске наилучшего варианта из множества структур. Кроме того, важным фактом является то, что при выборе рациональной структуры необходимо учитывать, что улучшение одного показателя, как правило, приводит к ухудшению других показателя, к примеру, улучшение массогабаритных показателей, может приводить к снижению качества выходного напряжения и ухудшению показателей надёжности.

В настоящее время задача выбора рациональной структуры МЭС решается с учётом накопленного практического опыта проектирования и эксплуатации таких станций, а также с использованием новых функциональных элементов, имеющих улучшенные технико-экономические и эксплуатационно-технические показатели.

Предлагается способ выбора рациональной структуры по определению суммы длины векторов, каждый из которых характеризует зависимость двух параметров. Рассмотрим способ выбора рациональной структуры на примере двух мобильных станций, выполненных на базе МВСЭ и ДЭС.

На рисунке 4.5 приведены вектор \bar{B}_1 характеризующий зависимость стоимости станции от мощности $C=f(P)$ и вектор \bar{B}_2 , характеризующий зависимость массы станции от мощности $M=f(P)$. Рациональное (оптимальное) структурно-схемное решение мобильной электростанции будет то, которое, во-первых, удовлетворяет требованиям по предельному ограничению показателей оценки эффективности (минимальной мощности – P_{min} ; максимальной стоимости – C_{max} ; максимальной массе – M_{max}), а во-вторых, у которой длина вектора \bar{B} , определяющая как сумма двух векторов \bar{B}_1 и \bar{B}_2 , будет иметь наименьшее значение.

Для МВСЭ

$$\bar{B}_{МВСЭ} = \bar{B}_{1C} + \bar{B}_{1M}, \quad (4.5)$$

а для МЭС, выполненной на базе ДЭС

$$\bar{B}_{ДЭС} = \bar{B}_{2C} + \bar{B}_{2M}, \quad (4.6)$$

Если ввести масштабный коэффициент K_M , определяющий длину вектора в сантиметрах, то соотношения суммарных векторов, в соответствии с рисунком 4.2, характеризующих зависимости параметров МЭС от мощности будет равно:

$$\bar{B}_{ДЭС} = 1,14\bar{B}_{МВСЭ}, \quad (4.7)$$

где 1,14 – коэффициент, показывающий во сколько раз длина вектора $\bar{B}_{ДЭС}$ больше длины вектора $\bar{B}_{МВСЭ}$.

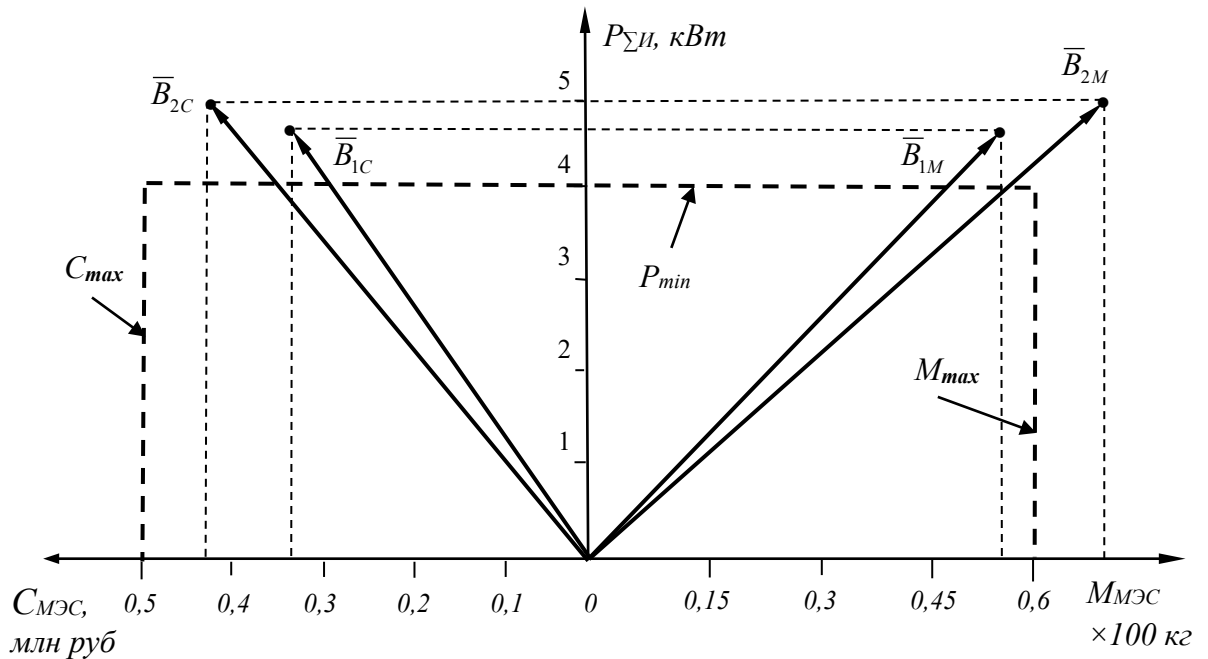


Рисунок 4.5 – Сравнение двух вариантов структурных схем мобильных электростанций: В1 – МВСЭ; В2 – ДЭС

4.3 Техничко-экономическое обоснование постановки на серийное производство ветро-солнечных электростанций малой мощности

Расчёт проводится для мелко серийного выпуска 100 шт. МВСЭ мощностью 3 кВт. Первоначально необходимо определить затраты на НИОКР [89].

Общие затраты на проведение НИОКР (общий фонд зарплаты с начислениями) определяется путем суммирования отдельных составляющих:

$$Z_{НИОКР} = Z_0 + Z_д + Z_э + H + Z_{СК} \cdot K_{ТР}, \quad (4.8)$$

где Z_0 – основная заработная плата;

Z_d – дополнительная заработная плата;

$Z_э$ – затраты на энергоресурсы;

H – накладные расходы;

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

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

В общем случае затраты на разработку МВСЭ складываются из расходов по следующим статьям: затраты на комплектующие; заработная плата разработчиков; затраты на энергоносители. Сведения расходов на заработную плату разработчиков приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Заработная плата разработчиков МВСЭ

| № 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 | 450 | 1 | 24 | 10800 |
| | | Техник | 350 | 1 | 24 | 8400 |
| 4 | Испытания и наладка станции | Инженер | 450 | 1 | 12 | 5400 |
| | | Техник | 350 | 1 | 12 | 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 | 345 | 1 | 6 | 2070 |
| | | Инженер | 450 | 1 | 4 | 1800 |
| ИТОГО | | | | | | 44920 |

Данные по зарплате брались по среднему уровню по соответствующей отрасли в Краснодарском крае за 2020 год на примере предприятия ООО «Солнеч-

ный центр». Принимаем, что надбавка к зарплате будет отсутствовать, то есть $Z_d = 0$.

Основная заработная определяется по формуле:

$$Z_o = 44\,920 + 44\,920 \cdot K_H = 44\,920 + 44\,920 \cdot 0,31 = 58\,845 \text{ руб.}, \quad (4.9)$$

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

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

$$H = 58\,845 \cdot 0,3 = 17\,653 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

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

В таблице 4.5 приведены сведения о стоимости основных функциональных элементов МВСЭ мощностью 3 кВт и комплектующих. МВСЭ состоит из ВЭУ мощностью 300 Вт, СБ с суммарной мощностью 2500 Вт. В качестве резервных источников применяются БЭС мощностью 2 кВт и аккумуляторные батареи общей емкостью 100 А·ч.

Таблица 4.5 – Комплектующие одной МВСЭ мощностью 3 кВт

| № п/п | Наименование | Цена, руб | Количество | Общая цена, руб |
|-------|---|-----------|------------|-----------------|
| 1 | Роторная ВЭУ YASHEL WT300 | 70000 | 1 | 70000 |
| 2 | Солнечный модуль PLM-250P-60 | 16500 | 10 | 165000 |
| 3 | Аккумуляторная батарея модель GX12-100 | 4000 | 1 | 4000 |
| 4 | Инвертор SmartWatt 24V | 20000 | 1 | 20000 |
| 5 | Контроллер PWM 2440 | 4100 | 1 | 4100 |
| 6 | Автоприцеп грузоподъемностью 500 кг «Классика плюс 500» | 68700 | 1 | 68700 |
| 7 | Комплектующие, включая каркас, разъемы, провода и т.п. | 20000 | | 20000 |
| ИТОГО | | | | 351800 |

В составе МВСЭ применим современную роторную ВЭУ мощностью 300 Вт (YASHEL WT300). Солнечный модуль PLM-250P-60 имеет мощность 250 Вт, для обеспечения мощности СБ 2,5 кВт, необходимо 10 таких панелей.

Таким образом, суммарные затраты на функциональные элементы МВСЭ и комплектующие $Z_{СК} = 351\,800$ руб.

Таким образом общие затраты на проведение НИОКР в соответствии с (4.8) составляют:

$$Z_{\text{НИОКР}} = 58\,845 + 1000 + 17\,653 + 351\,800 \cdot 1,05 = 446\,888 = 426\,296 \text{ руб.}$$

В таблице 4.6 приведена полная калькуляция себестоимости производства одной МВСЭ мощностью 3 кВт с резервными источниками электроэнергии.

Таблица 4.6 – Полная калькуляция себестоимости производства одной МВСЭ мощностью 3 кВт

| № п/п | Статья калькуляции | Сумма, руб |
|-------|--|------------|
| 1 | Стоимость функциональных элементов (ветроустановка, солнечные модули, инвертор, контроллер, бензоэлектростанция, аккумуляторная батарея) | 263 100 |
| 2 | Автоприцеп грузоподъемностью 500 кг | 68 700 |
| 3 | Комплектующие изделия | 20 000 |
| 4 | Основная зарплата производственных рабочих | 10 000 |
| 5 | Начисления на зарплату в различные фонды | 91 125 |
| 6 | Стоимость израсходованных энергоресурсов | 1000 |
| | ИТОГО | 453 925 |

Основная заработная плата производственных рабочих начисляется с учетом выполнения сборочно-монтажных и регулировочных работ составляет примерно 10 000 руб. Таким образом, полная себестоимость производства одной МВСЭ с резервными источниками электроэнергии составляет $C_{\Pi} = 453\,925$ руб. Учитывая нормативную рентабельность валовую прибыль, принимаем в размере 25 % от себестоимости:

$$P_B = 453\,925 \cdot 0,25 = 113\,481 \text{ руб.} \quad (4.11)$$

Тогда оптовая цена установки составит

$$C_{\text{ОПТ}} = C_{\Pi} + P_B = 453\,925 + 113\,481 = 567\,406 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

Договорная цена с учетом 18 % НДС составит:

$$C_{\text{ДОГ}} = 567\,406 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 669\,539 \text{ руб.} \quad (4.13)$$

Чистая прибыль от реализации одной МВСЭ с учётом налога на прибыль (НП):

$$П_{ч} = П_{в} \cdot \left(1 - \frac{НП}{100}\right) = 113\,481 \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 90\,785 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

Годовая прибыль от реализации 100 шт. МВСЭ составит:

$$П_{вг} = П_{вч} \cdot n = 90\,785 \cdot 100 = 9\,078\,500 \text{ руб.} \quad (4.15)$$

При расчёте капитальных затрат (КЗ) на производство 100 шт. МВСЭ, учитываются затраты на проведение НИОКР ($Z_{\text{НИОКР}}$) и затрат на освоение производства и доработку опытных образцов, корректировку документации (КД):

$$K_3 = Z_{\text{НИОКР}} + 1,05(n \cdot C_{\text{п}}) = 426\,296 + 1,05(100 \cdot 453\,925) = 48\,088\,421 \approx 48 \text{ млн руб.} \quad (4.16)$$

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

$$K_{\text{ос}} = 0,1(n \cdot C_{\text{п}}) = 0,1(100 \cdot 453\,925) = 4\,539\,250 \text{ руб.} \quad (4.17)$$

Капиталовложения в производственные фонды ($K_{\text{пф}}$) с учетом, что производство осуществляется на имеющемся оборудовании предприятия (капиталовложения в основные фонды составляет $K_{\text{оф}}=500\,000$ руб):

$$K_{\text{пф}} = K_{\text{ос}} + K_{\text{оф}} = 4\,538\,250 + 500\,000 = 5\,038\,250 \approx 5 \text{ млн руб.} \quad (4.18)$$

Полные капиталовложения будут в размере:

$$K_{\text{п}} = K_3 + K_{\text{пф}} = 48 + 5 = 53 \text{ млн руб.} \quad (4.19)$$

Для реализации проекта берется кредит в Сбербанке $K_{\text{к}} = 53 \text{ млн руб.}$ под 11 % ($E_{\text{к}}$) годовых с равномерными выплатами по кредиту в течение $T_{\text{к}} = 10$ лет.

Расчет выплат по кредиту проводится с учётом формулы:

$$K_m = \frac{E_{\text{к}}(1 + E_{\text{к}})^{T_{\text{к}}}}{(1 + E_{\text{к}})^{T_{\text{к}}} - 1} \cdot K_{\text{п}} = \frac{0,11(1 + 0,11)^{10}}{(1 + 0,11)^{10} - 1} \cdot 53\,000\,000 = 8\,999\,476 \text{ руб.}, \quad (4.20)$$

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

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

$$K_m = 8\,999\,476 \cdot 10 = 89\,994\,760 \text{ руб.} \quad (4.21)$$

Чистый дисконтированный доход определяется по формуле [89]:

$$ЧДД = \sum_{m=1}^{T_k} \frac{П_{Г1} - K_m}{(1 + E)^m} - K_{П}, \quad (4.22)$$

где $E = 0,07$ – норма дисконта.

Расчет ЧДД проведем на 6 лет реализации проекта:

$$ЧДД = \sum_{m=1}^6 \frac{9\,078\,500 - 89\,994\,760}{(1 + 0,07)^6} - 53\,126\,671 = 9\,100\,776 \text{ руб.}, \quad (4.23)$$

Таким образом, через 6 лет после эксплуатации МВСЭ они будут приносить прибыль, поскольку капитальные затраты окупаются с учётом ежегодной выплаты кредита. Через 6 лет предприятие может выпускать МВСЭ за счёт собственных средств без кредита. Основные результаты технико-экономического расчёта приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты технико-экономического расчёта

| № п/п | Критерии оценки | Показатели |
|-------|--|------------|
| 1 | Затраты на НИОКР, млн руб | 0,426 |
| 2 | Себестоимость производства одной установки, млн руб | 0,454 |
| 3 | Годовая прибыль от реализации одной установки, млн руб | 9,08 |
| 4 | Количество выпускаемых МВСЭ, шт. | 100 |
| 5 | Полные капиталовложения, млн руб | 53,0 |
| 6 | Кредит, млн руб | 53 |
| 7 | Ежегодный платеж по кредиту, млн руб | 8,99 |
| 8 | Срок окупаемости, лет | 6 |

Таким образом, ЧДД за 6 лет производства 100 шт. МВСЭ составит 9,10 млн руб.

4.4 Выводы

Для подтверждения результатов теоретических исследований разработан испытательный стенд. Получены диаграммы сигналов управления по реализации ШИМ и выходного напряжения инвертором. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показало, что расхождение находится в доверительных границах по относительной погрешности напряжения и тока $\pm 3,8$ %, а расхождение средних значений исследуемых параметров теоретических и экспериментальных данных – от $-4,4$ до $+4,2$ %. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что проведенные экспериментальные исследования подтверждают достоверность полученных теоретических выводов.

Проведена оценка технико-экономических показателей двух вариантов мобильных электростанций проектируемой МВСЭ, где в качестве резервного источника, применяются бензогенератор и АБ и станции, выполненной на базе ДЭС, где в качестве резервного источниками, применяются АБ. Показано, что общие затраты, включающие капитальные и эксплуатационные расходы в течение сезона на мобильную электростанцию, выполненную на ДЭС составляют 428265 руб, что на 97199 руб. или в 1,3 раза больше чем на МВСЭ.

Предлагается графоаналитический способ выбора рациональной структуры мобильной электростанции по определению суммы длины векторов, каждый из которых характеризует зависимость двух параметров. Вектор $\bar{B}1$ характеризующий зависимость стоимости станции от мощности $C=f(P)$, а вектор $\bar{B}2$, характеризующий зависимость массы станции от мощности $M=f(P)$. Рациональное (оптимальное) структурно-схемное решение мобильной электростанции будет то, которое, во-первых, удовлетворяет требованиям по предельному ограничению показателей оценки эффективности (минимальной мощности – P_{min} ; максимальной стоимости – C_{max} ; максимальной массе – M_{max}), а во-вторых, у которой

длина вектора \bar{B} , определяющая как сумма двух векторов \bar{B}_1 и \bar{B}_2 , будет иметь наименьшее значение.

Проведено технико-экономическое обоснование постановки на серийное производство 100 шт. МВСЭ. Затраты на НИОКР составляют 426 тыс. руб. При этом капитальные вложения составляют 53 млн руб. Отпускная цена одной установки составляет 454 тыс. руб. Срок окупаемости МВСЭ около 6 лет с учётом ежегодной выплаты кредита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана структурная схема МВСЭ, которая включает ветроустановку, солнечные и аккумуляторные батареи, бензоэлектростанцию, инвертор напряжения и контроллер заряда, а также автоматическую систему управления (АСУ), которая не только контролирует параметры и подключает источники к потребителям электроэнергии в зависимости от потенциала ВИЭ, но и учитывает приоритет отдельных видов нагрузки. Разработан алгоритм работы АСУ мобильной станции в основных режимах её функционирования.

2. Разработана методика расчёта МВСЭ с использованием итерационного подхода, которая на основании оценки потенциалов ветровой и солнечной энергетики, графика нагрузок, позволяет минимизировать массогабаритные и стоимостные показатели мобильной станции, за счёт определения рационального соотношения мощностей источников электроэнергии и повысить ее эксплуатационно-технические характеристики. Так для Юга России для удаленных от энергосистемы МФХ оптимальное соотношение мощностей между источниками электроэнергии ВЭУ, СБ и АБ находится в процентном соотношении: 15/65/20 %. При общей мощности источников МВСЭ 3 кВт масса станции с автоприцепом составляет 550–600 кг, а стоимость – 250 тыс. руб.

3. Разработана функциональная схема инвертора напряжения с промежуточной частотой преобразования 2 кГц, в которой применяются реверсивный выпрямитель и выходной фильтр, позволяющие улучшить качество выходного напряжения. Принципиальная электрическая схема системы управления инвертора выполнена на основе 8-разрядного микроконтроллера типа PIC16F1847, позволяет работать с малым шагом и высокой точностью.

4. В программном комплексе SimInTech реализована компьютерная модель инвертора, которая позволяет исследовать форму и параметры сигналов управления, получать внешнюю и регулировочные характеристики. Качество выходного

напряжения оценивалась по спектральной плотности гармонического состава. Так в номинальном режиме работы содержание высших составляющих в процентном отношении к первой гармонике следующее - 2-я 2,7%, 3-я 3,8%, 4-я 0,8 %, 5-я 1,1% 6-я 0,2% 7-я 0,09 % и т. д.

5. Для подтверждения результатов теоретических исследований реализована физическая модель инвертора напряжения, на которой проведены эксперименты и дана оценка достоверности полученных результатов. При изменении величины нагрузки осуществлялся контроль выходного напряжения, тока и длительность переходных процессов. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показало, что расхождение находится в доверительных границах по относительной погрешности напряжения и тока $\pm 3,8$ %, а расхождение средних значений исследуемых параметров теоретических и экспериментальных данных - от $-4,4$ до $+4,2$ %. Полученные результаты подтверждают достоверность полученных теоретических выводов.

6. Используя предложенный графоаналитический способ определения рациональной структуры мобильной энергоустановки на основе экономических и массогабаритных показателей проведена оценка двух вариантов структурных схем: предложенной МВСЭ и, выполненной на базе ДЭС, где в качестве резервных источников применялись аккумуляторные батареи. При мощности инвертора 3 кВт ориентировочная стоимость комплектующих элементов инвертора не превышает 15 тыс. руб, а масса составляет не более 4,5 кг.

7. Проведено технико-экономическое обоснование постановки на серийное производство 100 шт. МВСЭ на основе чистого дисконтированного дохода. Затраты на НИОКР составляют 426 тыс. руб. При этом капитальные вложения составляют 53 млн руб. Отпускная цена одной установки составляет 454 тыс. руб. Срок окупаемости МВСЭ около 6 лет с учётом ежегодной выплаты кредита.

Проведена оценка технико-экономических показателей двух вариантов мобильных электростанций проектируемой МВСЭ, где в качестве резервного источника, применяются бензогенератор, АБ и станция, выполненная на базе ДЭС. Показано, что общие затраты, включающие капитальные и эксплуатационные расхо-

ды в течение сезона на мобильную электростанцию, выполненную на ДЭС, в 1,3 раза больше, чем на МВСЭ.

Рекомендации производству

Для разработки энергоэффективных структурно-схемных решений МВСЭ необходимо использовать методику расчёта и способ выбора рациональной структуры мобильной электростанции, рассмотренные в диссертации. Полученные результаты исследований, расширяют и углубляют знания в разработке МВСЭ для электроснабжения автономных потребителей электроэнергии МФХ. Внедрение мобильных электростанций снизит себестоимость продукции – повысить рентабельность сельскохозяйственного производства. Применение предложенного структурно-схемного решения МВСЭ повысить её конкурентоспособность в сравнении с известными техническими решениями мобильных электростанций.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку энергоэффективных функциональных элементов станций: преобразователей отдельных видов ВИЭ и стабилизаторов. Перспективным является создание мобильных электростанций модульного типа. Проводить разработку автоматизированных систем управления, осуществляющих не только контроль параметров и подключение или отключение источников электроэнергии, но и адаптивное изменение структуры автономной системы электроснабжения с учётом приоритета нагрузки.

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

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АБ – аккумуляторная батарея;
- АИ – автономный инвертор;
- АИЭ – автономный источник электроэнергии;
- АСУ – автоматическая система управления;
- АСЭ – автономная система электроснабжения;
- БЭС – бензоэлектростанция;
- ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
- ВСЭ – ветро-солнечная электростанция;
- ВЭС – ветроэнергетическая станция;
- ВЭУ – ветроэнергетическая установка;
- ДЭС – дизель-электрическая станция;
- К – контроллер;
- КМ – компьютерная модель;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- МГП – массогабаритные показатели;
- МВСЭ – мобильная ветро-солнечная электростанция;
- МФХ – малые фермерские хозяйства;
- МЭС – мобильная электростанция;
- СБ – солнечная батарея;
- СУ – система управления;
- СФЭС – солнечная фотоэнергетическая станция;
- СФЭУ – солнечная фотоэлектрическая установка;
- СЭС – система электроснабжения;
- ФЭ – функциональный элемент;
- СУ – система управления;
- ТЭП – технико-экономические показатели;
- ЭТХ – эксплуатационно-технические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономные инверторы солнечных электростанций / О.В.Григораш, Е.В.Воробьев, Е.А.Денисенко, П.М.Барышев // Техника и оборудование для села. – № 4 (310) . – 2023. – С. 38–42.
2. Амерханов, Р.А. Возможности использования возобновляемых источников энергии Краснодарского края / Р.А.Амерханов, А.С.Кириченко, Р.С.Касьянов // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 13–14. – С. 12–25.
3. Амерханов, Р.А. Перспективы ветровой энергетики Краснодарского края / Р.А.Амерханов, А.Э.Коломейцев // В книге: Научно-технологическое обеспечение агропромышленного комплекса России: проблемы и решения. Сборник тезисов по материалам II Национальной конференции. Отв. за выпуск А.Г.Коцаев. – 2018. – С. 132.
4. Амерханов, Р.А. Потенциал солнечной энергетики в России / Р.А.Амерханов, А.Э.Коломейцев // В книге: Научно-технологическое обеспечение агропромышленного комплекса России: проблемы и решения. Сборник тезисов по материалам Национальной конференции. Отв. за выпуск А.Г.Коцаев. – 2018. – С. 129.
5. Ахмед Торки Ахмед Джайлани Автономные системы электроснабжения фермерских хозяйств Египта с использованием возобновляемых источников энергии : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.02 / Ахмед Торки Ахмед Джайлани; [Место защиты: Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В.П. Горячкина]. – Москва, 2010. – 144 с. : ил.
6. Безруких, П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии / под ред. П.П.Безруких // СПб. : Наука, 2002. – 314 с.
7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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>.

11. Ветроэлектрические станции: монография / А.В.Квитко, О.В.Григораш, А.Ю.Попов, О.Я.Ивановский, А.С.Туаев. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 193 с.

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

13. Виссарионов, В.И. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / В.И.Виссарионов, С.В.Белкина, Г.В.Дерюгина [и др.]. – М.: 2004. – 448 с.

14. Возобновляемые источники электроэнергии: монография / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, Р.А.Сулейманов, Е.А.Власенко, А.Г. Власов; под общ. ред. О.В. Григораш. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 272 с.

15. Возобновляемые источники электроэнергии: термины, определения, достоинства и недостатки / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, А.Е.Усков, А.В.Квитко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 32. – С. 189–192.

16. Воробьев, Е.В. Солнечный инвертор на трансформаторе с вращающимся в магнитном поле / Е.В.Воробьев, А.Э.Коломейцев // В сборнике: Технологические инновации и научные открытия. Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции. Уфа. – 2021. – С. 34–38.

17. Воробьев, Е.В. Параметры и режимы работы автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки малых фермерских и личных подсобных хозяйств : дис. канд. техн. наук: 05.20.02. Краснодар : КубГАУ. 2022. – 127 с.
18. Воронин, С.М. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение / С.М.Воронин, С.В.Оськин, А.Н.Головко. – Краснодар: КубГАУ, 2006. – 267 с.
19. 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.
20. 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.
21. Григораш, О.В. Нетрадиционные источники электроэнергии в составе систем гарантированного электроснабжения / О.В.Григораш, Н.И.Богатырев, Н.Н.Курзин // Промышленная энергетика. – 2004. – № 1. – С. 59–62.
22. Григораш, О.В. Возобновляемые источники электроэнергии: состояние и перспективы / О.В.Григораш, Ю.Г.Пугачев, Д.В.Военцов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 8. – С. 24–25.
23. Григораш, О.В. Автономная энергетика сельского хозяйства: состояние и перспективы / О.В.Григораш, Н.И.Богатырев, Д.В.Военцов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар. – 2008. – № 3. – С. 216–220.
24. Григораш, О.В. Оценка эффективности автономных систем электроснабжения / О.В.Григораш, А.С.Оськина, Ю.Н.Тонкошуров // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар. – 2010. – № 25. – С. 177–180.

25. Григораш, О.В. Стабилизатор напряжения и частоты ветроэнергетической установки / О.В.Григораш, А.В.Квитко, Ю.М.Петренко // Труды КубГАУ. – Краснодар, 2010. – № 5. – С. 141–144.

26. Григораш, О.В. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения : монография / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, А.Е.Усков. – Краснодар, 2011. – 188 с.

27. Григораш, О.В. Структурно-параметрический синтез автономных систем электроснабжения / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, А.В.Квитко // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2–1. – С. 71–75.

28. Григораш, О.В. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы: монография / О.В.Григораш, С.В.Божко, А.Ю.Попов [и др.] – Краснодар, 2012. – 174 с.

29. Григораш, О.В. Об эффективности и целесообразности использования возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, В.В.Тропин, А.С.Оськина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ. – 2012. – № 83(09). – С. 506–517. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2012/09/pdf/38.pdf>.

30. Григораш, О.В. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, П.Г.Корзенков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 93(09). – С. 646–658. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/24.pdf>.

31. Григораш, О.В. Преобразователи и стабилизаторы параметров электроэнергии возобновляемых источников с улучшенными техническими характеристиками [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, А.С.Оськина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ. – 2013. – № 93(09). – С. 740–749. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/25.pdf>.

32. Григораш, О.В. Расчет мощности и выбор элементов ветроэлектрической установки [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, А.В.Квитко, Т.А.Сторожук // Труды Кубанского государственного университета. – 2013. – № 43. – С. 300–303. – Режим доступа : <https://kgau-works.kubsau.ru/issue/2013-43>.

33. Григораш, О.В. Ресурсы возобновляемых источников энергии Краснодарского края [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, А.А.Хамула, А.В.Квитко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92(08). – С. 630–641. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/12.pdf>.

34. Григораш, О.В. Способы синтеза оптимальной структуры автономных систем на возобновляемых источниках [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, П.Г.Корзенков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ. – 2014. – № 100(06). – С. 681–690. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/03.pdf>.

35. Григораш, О.В. Универсальный модульный статический преобразователь и стабилизатор параметров электроэнергии [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, Я.А.Семенов, Ю.Е.Кондратенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ. – 2014. – № 98(04). – С. 468–479. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/31.pdf>.

36. Григораш, О.В. Инверторы солнечных электростанций с улучшенными техническими характеристиками [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, А.Е.Усков, Я.А.Семёнов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 99(05). – С. 372–382. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/06.pdf>.

37. Григораш, О.В. О необходимости применения возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, М.М.Тарасов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного

аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2016. – № 118(04). – С. 949–962. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/57.pdf>.

38. Григораш, О.В. Концепция построения систем бесперебойного электроснабжения [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, М.С.Чумак, А.А.Кривошей // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ. – 2016. – № 119(05). – С. 1159–1179. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/05/pdf/81.pdf>.

39. Григораш, О.В. Автономные гибридные электростанции [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, А.А.Кривошей, В.В.Смык // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. Краснодар : КубГАУ. – 2016. – № 124(10). – С. 1441–1452. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/95.pdf>.

40. Григораш, О.В. Солнечные энергосистемы гарантированного электроснабжения [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, Ю.Е.Кондратенко, М.А.Попучиева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ. – 2016. – № 124(10). – С. 1467–1480. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/97.pdf>.

41. Григораш, О.В. Автономные гибридные электростанции [Электронный ресурс] / О.В.Григораш, А.А.Кривошей, В.В.Смык // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. – Краснодар : КубГАУ. – 2016. – № 124(10). – С. 1441–1452. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/95.pdf>.

42. Григораш, О.В. Автономные энергетические комплексы на возобновляемых источниках энергии / О.В.Григораш, А.Э.Коломейцев // В книге: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник тезисов по материалам Всероссийской (национальной) конференции. Ответственный за выпуск А. Г. Кошцаев. – 2019. – С. 637–638.

43. Григораш, О.В. Оценка эффективности автономных систем электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О.В.Григораш, А.Ю.Попов, А.Э.Коломейцев, С.Джибо // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 6 (122). – С. 30–34.

44. Григораш, О.В. Направления развития и внедрения возобновляемой энергетики / О.В.Григораш, А.Э.Коломейцев // В книге: Научно-технологическое обеспечение агропромышленного комплекса России: проблемы и решения. Сборник тезисов по материалам III Национальной конференции. Отв. за выпуск А.Г.Коцаев. – 2019. – С. 170.

45. Григораш, О.В. Состояние мировой возобновляемой энергетики и её перспективы в России / О. В. Григораш, С.Джибо, А.Э.Коломейцев // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – Краснодар: КСЭИ. – 2019. – № 4. – С. 101–106.

46. Григораш, О.В. Тенденции в развитии мировой энергетики / О.В.Григораш, А.Э.Коломейцев // В книге: Институциональные преобразования АПК России в условиях глобальных вызовов. Сборник тезисов по материалам IV Международной конференции. Отв. за выпуск А.Г.Коцаев. – 2019. – С. 141.

47. 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.

48. 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.

49. Григораш, О.В. Особенности расчета мощности и выбора основных функциональных элементов солнечной электростанции / О.В.Григораш, А.Э.Коломейцев, Е.Г.Попова // В сборнике: Стратегии и векторы развития АПК. Сборник статей по материалам национальной конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ. Отв. за выпуск А.А.Титученко. –Краснодар. – 2021. – С. 343–348.

50. Григораш, О.В. Стационарные и транспортные солнечные энергосистемы / О.В.Григораш, Т.С.Бойко, А.Э.Коломейцев // В сборнике: Стратегии и векторы развития АПК. Сборник статей по материалам национальной конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ. Отв. за выпуск А.А.Титученко. – Краснодар. – 2021. – С. 338–342.

51. Григораш, О.В. Электромагнитная совместимость функциональных элементов автономных систем электроснабжения / О.В.Григораш, С.Джибо, А.Э.Коломейцев // Сельский механизатор. – 2021. – № 1. – С. 32–33.

52. Григораш, О.В. Ветро-солнечные электростанции в сельскохозяйственном производстве / О.В.Григораш, Е.А.Денисенко, Ю.В.Даус // В сборнике: Технические и технологические системы. Материалы тринадцатой Международной научной конференции. Краснодар. – 2022. – С. 194–195.

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

54. 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.

55. Григораш, О.В. Стабилизаторы напряжения малых ветроэнергетических установок / О.В.Григораш, С.В.Оськин, Е.А.Денисенко // Техника и оборудование для села. – 2023. № 7 (313). – С. 39–43.

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

57. 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.

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

59. Даус, Ю.В. Ресурсный потенциал солнечной энергии для установок, использующих её 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>.

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

61. Еремин, Л. М. О роли локальных источников небольшой мощности на рынке электроэнергетики / Л.М.Еремин // Энергетик. – 2003. – № 3. – С. 22–24.

62. 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.

63. К расчету экономической эффективности ветроэлектрических установок / О.В.Григораш, Р.А.Сулейманов, А.В.Квитко, А.О.Григораш // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 6 (33). – Краснодар. – С. 192 – 196.

64. Каабече, А. Технико-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>.

65. Квитко, А.В. Автономные ветроэлектрические установки и системы [Электронный ресурс] / А.В.Квитко, Я.А.Семенов, Г.С.Отмахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. –Краснодар: КубГАУ. – 2015. – № 112(08). – С. 1003–1015. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/72.pdf>.

66. Квитко, А.В. Характеристики ветра, особенности расчета ресурса и экономической эффективности ветровой энергетике / А.В.Квитко, А.О.Хицкова //

Научный журнал КубГАУ – Scientific Journal of KubSAU. – Краснодар: КубГАУ. – 2014. – № 97.

67. Квитко, А.В. Перспективы и особенности работы солнечных фотоэлектрических станций [Электронный ресурс] / А.В.Квитко, Г.С.Отмахов // Поли тематический 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>.

68. Кирпичникова, И.М. О возможности применения возобновляемых источников энергии для объектов первой категории электроснабжения / И.М.Кирпичникова, С.С.Шипилов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 3 (137). – С. 63–67.

69. Кирпичникова, И.М. Проблема деградации солнечных модулей и пути ее решения / И.М.Кирпичникова // В сборнике: Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы. Материалы Международной научно-практической конференции. Краснодар. – 2023. – С. 92–97.

70. 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.

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

72. 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.

73. 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>.

74. 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.).

75. 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>.

76. 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.

77. Муругов, В.П. Расширение сферы использования возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве / В.П.Муругов, А.Б.Пинов // Техника в сельском хозяйстве. – 1996. – № 2. – С. 17–18.

78. Национальный стандарт РФ. Возобновляемые источники энергии. Технические требования к фотоэлектрическим солнечным станциям [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 70787–2023. – Введ. 2023–08–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/03c45946-8c93-46a7-96ca-4b4e50419bab>.

79. 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>.

80. 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>.

81. 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>.

82. Национальный стандарт РФ. Установки ветроэнергетические. Ч. 2. Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам [Электронный ре-

сурс] : ГОСТ 54418.2 – 2014. – Введ. 2016–07–01. – Режим доступа : <https://gostassistant.ru/doc/ad41fdf6-0a9e-4419-b5ad-1b76161d48f4>.

83. 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>.

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

85. Николаев, В.Г. Перспективы развития возобновляемых источников энергии в России. Результаты проекта TACIS Europe Aid/116951/ C/SV/RU. // Под ред. В.Г.Николаева. – М. : Изд. «АТМОГРАФ». – 2009. – 456 с.

86. Новая элементная база возобновляемых источников электроэнергии : монография / О.В.Григораш, А.Ю.Попов, Е.В.Воробьев [и др.]. Краснодар : КубГАУ. 2018. – 202 с.

87. Новокрещенов, О.В. Комбинированные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс] / О.В. Новокрещенов, Г.С.Отмахов, М.Ю.Хуаде // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2017. – № 132(08). – С. 786–797. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/63.pdf>.

88. Определение точной информации об интенсивности солнечной радиации / Ю.В.Даус, Е.А.Денисенко, Д.А.Десятниченко, Д.Н.Грищенко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 2– (70). – С. 515–523.

89. Оськин С.В. 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.

90. Патент 2421871. Автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, А.Е.Усков, Ю.Н.Тонкошкuroв, А.Э.Сулейманов. Заявл. 12.05.2010. Опубл. 20.06.2011. Бюл № 17.

91. Патент 2426216. Трехфазный инвертор / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, Е.А.Власенко, А.Е.Усков, Ю.В.Шиян. Заявл. 16.02.2010. Опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22.

92. Патент 2457598. Устройство бесперебойного электроснабжения / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, А.Е.Усков, А.Н.Соболь, И.А.Павлов. Заявл. 07.06.2011. Опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21.

93. Перспективы возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае / О.В.Григораш, Е.В.Воробьев, В.П.Коваленко, А.Г.Власов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар. – 2012. – № 39. – С. 123–126.

94. 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.

95. 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.

96. Ресурсы и технологии использования возобновляемых источников энергии : учеб. пособие / В.В.Елистратов, И.В.Богун, Р.С.Денисов, И.Г.Кудряшева, М.В.Романов. – СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2022. – 528 с.

97. 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>.

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

99. 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.

100. Системы гарантированного электроснабжения / О.В.Григораш, А.Ю.Попов, Е.А.Власенко, О.Я.Ивановский, А.С.Туаев : монография. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – 223 с.

101. Соболев, А.Н. Разработка устройств защиты автономных асинхронных генераторов ветроэнергетических установок от повреждений обмотки статора / А.Н.Соболев, А.А.Андреева, А.Э.Коломейцев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2021. – № 3 (131). – С. 54–56.

102. Современное состояние производства электроэнергии возобновляемыми источниками в мире и России / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, А.С.Пономаренко, Ю.В.Кондратенко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар. – 2012. – № 39. – С. 159–162.

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

104. Соломин, Е.В. Экономические аспекты гибридных ветро-солнечных установок малой мощности / Е.В.Соломин //Альтернативная энергетика и экология . – 2012. – № 2 (106). – С. 71–77.

105. 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.

106. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива / Показатели по территориям. – М.: «ИАЦ Энергия», 2007. – 272 с.

107. Структурно-схемные решения солнечных автономных инверторов / Григораш О.В., Воробьев Е.В., Денисенко Е.В., Барышев П.М. // Известия Ниж-

неволжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 2 (70). – С. 439–450.

108. 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.

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

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

111. 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.

112. Фролов, В.А. Электронная техника: учебник / В.А.Фролов. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железно-дорожном транспорте», 2015. – 532 с.

113. Хорольский, В.Я. Анализ и синтез систем автономного электроснабжения сельскохозяйственных объектов: монография / В.Я.Хорольский, М.А.Таранов : Ростов-на-Дону, Терра, 2001. – 222 с.

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

115. 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.

116. 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.

117. Automatic Voltage Stabilizer using a PWM controlled AC-AC converter topology [Electronic resource] / D.Thomas, K.J.Mathews, L.Thomas, G.S.Babu, S.Saji Kurian // 2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kannur, India, 2022, pp. 51-58, doi : 10.1109/ICICT54557.2022.9917668. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9917668>.

118. 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>.

119. Bhukya, J. Modelling of Power System Stabilizer for Double Fed Induction Generator based Wind Power System [Electronic resource] / J.Bhukya, V.Mahajan // 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON), Kurukshetra, India, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/POWERI.2018.8704411. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8704411>.

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 Tek

hniki = 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. Development of AC Voltage Stabilizer with Microcontroller-Based Control System [Electronic resource] / A.Holovatyy, A.Łukaszewicz, V.Teslyuk, N.Ripak // 2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2022, pp. 527-530, doi: 10.1109/CSIT56902.2022.10000461. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10000461>.

123. 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>.

124. 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>.

125. Khozyainov, B.P. Economic justification for the use of a vertical axis wind power plant in wind conditions of Russia [Electronic resource] / B.P.Khozyainov, T.N.Svistunova // iPolytech Journal. 2020;24(6):1285-1296. (In Russian). – Access mode : <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1285-1296>.

126. Kosykh, E.A. AC Voltage Stabilizer for Overload and Overvoltage in Low-Voltage Networks [Electronic resource] / E.A.Kosykh // XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2021, pp. 125-129, doi: 10.1109/APEIE52976.2021.9647655. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9647655>

127. 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>

128. 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>.

129. 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>.

130. Uninterruptible power supply for renewable energy sources [Electronic resource] / O.V.Grigorash, A.Y.Popov, E.V.Vorobev, O.Y.Ivanovsky, A.S.Tuaeov // 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>.

131. 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>

132. Wind Turbine Voltage Stabilizer Based on Voltage Lookup Table [Electronic resource] / Soedibyoy, A.L.S.Budi, A.Ashari, D.C.Riawan, D.R.A.Fitrah // 2022 2nd International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System (ICE3IS), Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 57-62, doi: 10.1109/ICE3IS56585.2022.10010284. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10010284>.

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



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО НТК
«Солнечный центр»



И.Б.Самородов
2024 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. и 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» была передана в ООО НТК «Солнечный центр» разработанная соискателем Коломейцевым А.Э. под руководством д.т.н., профессора Григораш О.В. методика инженерного расчёта, позволяющая определять параметры и оптимальные соотношения мощностей источников электроэнергии мобильной ветро-солнечной электростанции малой мощности.

Указанная методика была использована ООО НТК «Солнечный центр» для подготовки Техничко-коммерческого предложения для нужд фермерского хозяйства Стебляк Н.Н. в Мостовском районе Краснодарского края.

В дальнейшем методика будет использоваться в ООО НТК «Солнечный центр», что позволит сократить сроки проектирования энергоэффективных мобильных ветро-солнечных электростанций.

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

А.Э. Коломейцев

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


Общество с ограниченной ответственностью

«Энерготехнологии-Сервис»

350000, г. Краснодар,
ул. Садовая, 223
тел. 8(861)251-77-67, 254-16-19
ets@nextmail.ru

исх. № 20/4 от «01» февраля 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Энерготехнологии-Сервис»
д.т.н.  В.А.Бутузов

« 01 »  2024 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 Бутузов В.В.; от КубГАУ заведующий кафедрой д.т.н., профессор Григораш О. В., соискатель Коломейцев А.Э., составили настоящий акт о том, что кафедрой Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии переданы в ООО «Энерготехнологии-Сервис» разработанные соискателем Коломейцевым А.Э. под руководством профессора Григораш О.В. математический аппарат для оценки эффективности мобильных энергосистем, выполненных на возобновляемых источниках энергии.

Математический аппарат используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» при расчёте основных показателей оценки эффективности мобильных энергосистем, выполненных на ветроэнергетических и солнечных фотоэнергетических установках.

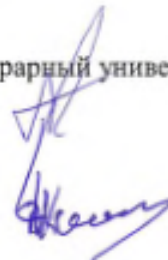
Главный инженер
ООО «Энерготехнологии-Сервис»



В.В.Бутузов

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

Заведующий кафедрой



О.В. Григораш

Соискатель

А.Э.Коломейцев

Приложение В. Акт о внедрении результатов НИР в учебном процессе
на факультете энергетики в Кубанском ГАУ

УТВЕРЖДАЮ
первый проректор КубГАУ
д.э.н., профессор С.М. Резниченко
« 29 » _____ 2024 г.



о внедрении в учебный процесс результатов исследований по кандидатской диссертационной работе соискателя Коломейцева Александра Эдуардовича 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 Григораш О. В.; профессора кафедры «Применения электроэнергии», д.т.н., профессор Юдаев И.В. настоящим актом подтверждаем, что результаты исследований по кандидатской диссертации «Параметры и режимы работы мобильной ветро-солнечной электростанции малых фермерских хозяйств», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебном процессе на факультете энергетики.

Комиссия установила, что материалы диссертационной работы соискателя Коломейцева А.Э. применяются при изучении дисциплины «Электрооборудование возобновляемой энергетики» на кафедре «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии» при рассмотрении раздела «Солнечная энергетика».

Комиссия считает, что материалы кандидатской диссертации соискателя Коломейцева А.Э., рассматриваемые при изучении дисциплины «Электрооборудование возобновляемой энергетики» соответствуют требованиям образовательного стандарта по направлению подготовки Агроинженерия 35.03.06, направленность «Электрооборудование и электротехнологии».

Председатель комиссии _____ А.А. Шевченко

Члены комиссии _____ О.В. Григораш

_____ И.В. Юдаев