

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

На правах рукописи

Воробьев Евгений Васильевич



**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА
СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
МАЛЫХ ФЕРМЕРСКИХ И ЛИЧНЫХ ПОДСОБНЫХ ХОЗЯЙСТВ**

Специальность: 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

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

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Григораш О.В.

Краснодар

2021

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1 Востребованность солнечных электростанций малой мощности в сельскохозяйственном производстве	12
1.2 Особенности конструкции и работы автономных солнечных фотоэнергетических установок.....	19
1.3 Автономные инверторы солнечных электростанций.....	22
1.4 Выводы и задачи исследований.....	29
2 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СТРУКТУРНО- СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ.....	32
2.1 Критерии оценки эффективности автономных инверторов солнечных фотоэнергетических установок.....	32
2.2 Функциональные схемы автономных инверторов на трансформаторе с вращающимся магнитным полем	47
2.3 Принципиальная электрическая схема автономного инвертора и алгоритм работы системы управления	59
2.4 Выводы.....	64
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НА ТРАНСФОРМАТОРЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	68
3.1 Особенности математического моделирования инверторов и трансформаторов автономных систем электроснабжения	68
3.2 Разработка электрической схемы замещения и блок-схемы компьютерной модели	71
3.3 Расчет параметров электрической схемы замещения	73
3.4 Результаты компьютерного моделирования режимов работы инвертора на трансформаторе с вращающимся магнитным полем.....	80

3.5 Выводы	85
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	88
4.1 Методика экспериментальных исследований и электрооборудование.....	88
4.2 Экспериментальные исследования.....	90
4.3 Техничко-экономическое обоснование постановки на серийное производство солнечных фотоэнергетических установок малой мощности.....	95
4.4 Выводы	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ	124

ОСНОВНЫЕ ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АБ – аккумуляторная батарея;
- АИ – автономный инвертор;
- АИЭ – автономный источник электроэнергии;
- АСЭ – автономная система электроснабжения;
- ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
- ВЭС – ветроэнергетическая станция;
- ВЭУ – ветроэнергетическая установка;
- ДЭС – дизель-электрическая станция;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- ЛПХ – личные подсобные хозяйства;
- МГП – массогабаритные показатели;
- МФХ – малые фермерские хозяйства;
- СБ – солнечная батарея;
- СУ – система управления;
- СФЭС – солнечная фотоэнергетическая станция;
- СФЭУ – солнечная фотоэлектрическая установка;
- СЭС – система электроснабжения;
- ТВМП – трансформатор с вращающимся магнитным полем;
- ФЭ – функциональный элемент;
- СУ – система управления;
- ТЭП – технико-экономические показатели;
- ЭТХ – эксплуатационно-технические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В настоящее время для электроснабжения автономных сельскохозяйственных потребителей малых фермерских и личных подсобных хозяйств, занимающихся производством мёда, мяса, шерсти, рыбы, выращиванием овощей и фруктов, а также для обеспечения бытовых условий обслуживающего персонала применяются бензо- или дизельные станции, имеющие низкие эксплуатационно-технические характеристики, в том числе небольшой ресурс работы [14, 56, 86, 135].

Сегодня актуальным направлением является внедрение энергоэффективных, в том числе энергосберегающих технологий в сельскохозяйственное производство за счёт применения возобновляемых источников энергии. Перспективным регионом для внедрения солнечной энергетики является Краснодарский край [55, 80, 110].

Важным функциональным элементом солнечных фотоэнергетических установок (СФЭУ) является солнечный автономный инвертор (АИ) напряжения, который, кроме функции преобразования электроэнергии постоянного тока в переменный, выполняет функцию стабилизатора напряжения. АИ оказывают существенное влияние на эксплуатационно-технические характеристики СФЭУ в комплексе. Эксплуатируемые в настоящее время АИ СФЭУ, применяемых в сельскохозяйственном производстве, имеют относительно низкие энергетические и технические характеристики, включая КПД и ресурс работы. Кроме того, они в основном являются источниками однофазного напряжения промышленной частоты тока.

Степень разработанности темы. Научные проблемы разработки энергоэффективных солнечных энергосистем исследовали многие учёные: Амерханов Р.А., Безруких П.П., Борисов Р.И., Гайтов Б. Х., Даус Ю.В., Елистратов В.В., Ерёмин Л.М., Кашин Я. М., Коноплёв Е. В., Лукитин Б.В., Никитенко Г.В., Саплин Л.А., Сибикин Ю.Д., Стребков Д.С., Четошникова Л.М.,

Юдаев И. В. и другие авторы [1, 2, 15, 86, 93, 102, 111, 112, 122, 127]. Работы ученых посвящены разработке математического аппарата, позволяющего оценить потенциал солнечной энергетики, энергоэффективность оборудования, применяемого в составе солнечных фотоэнергетических установок, а также большое внимание уделено особенностям проектирования и эксплуатации солнечных энергетических систем. Проблематикой, ставшей предметом диссертационного исследования, занимались известные ученые Григораш О.В., Козюков Д.А., Никитенко Г.В., Пятикопов С.М., Охоткин Г. П., Стребков Д. С., Усков А.Е. и многие другие учёные. Их работы были посвящены усовершенствованию конструктивных решений основных функциональных элементов этих систем. Однако вопросы электромагнитной совместимости АИ при использовании в их конструкции однофазной силовой электронной схемы преобразователя и однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем, а также вопросы оценки эффективности преобразователей недостаточно исследованы.

Рабочая гипотеза состоит в том, что применение однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем и микропроцессорной системой управления позволит обеспечить требуемое качество электроэнергии, расширить функциональные возможности автономного инвертора и улучшить эксплуатационно-технические характеристики солнечной фотоэнергетической установки в комплексе.

Целью диссертационного исследования является улучшение эксплуатационно-технических характеристик и функциональных возможностей автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки.

Для достижения поставленной цели исследований определены *задачи исследований*:

1. Разработать критерии оценки эффективности автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки.

2. Разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы солнечного автономного инвертора с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками на трансформаторе с вращающимся магнитным полем.

3. Разработать алгоритм работы системы управления автономным инвертором на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем по преобразованию и стабилизации напряжения.

4. Разработать методику расчета параметров электрической схемы замещения и компьютерную модель автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем.

5. Провести исследования компьютерной модели инвертора и экспериментальные исследования однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем и провести оценку достоверности компьютерного моделирования.

6. Провести технико-экономическое обоснование внедрения солнечной фотоэнергетической установки малой мощности.

Объектом исследования является автономный инвертор напряжения, выполненный на базе однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем.

Предмет исследования – показатели оценки эффективности автономного инвертора, результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

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.

Научную новизну работы составляют:

– критерии оценки эффективности автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки;

– алгоритм работы системы управления автономным инвертором на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем по преобразованию и стабилизации напряжения;

– методика расчета параметров электрической схемы замещения автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем.

– компьютерная модель автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем.

Теоретическую и практическую значимость работы составляют:

– результаты анализа особенностей конструкции и режимов работы эксплуатируемых солнечных автономных инверторов, позволяющие раскрыть основные недостатки и направления улучшения их эксплуатационно-технических характеристик;

– предложенные критерии оценки эффективности автономного инвертора, включающие не только значение КПД, массогабаритные показатели и показатели качества электроэнергии, но и показатели активной, реактивной и полной мощности, определяемые в различных режимах работы преобразователя, повысят эффективность предпроектных работ по созданию энергоэффективных солнечных фотоэнергетических установок;

– разработанные функциональные схемы солнечных автономных инверторов на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем, принципиальная электрическая схема управления инвертором и алгоритм её работы улучшают эксплуатационно-технические характеристики солнечной фотоэнергетической установки;

– результаты исследований компьютерной модели автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем позволяют определять значения токов и напряжений на элементах электрической схемы замещения автономного инвертора, а также длительность переходных процессов, что повысит эффективность разработки систе-

мы управления и защиты преобразователя с учётом различных режимов работы, включая аварийные;

– результаты экспериментальных исследований однофазно-трёхфазных трансформаторов, выполненных на асинхронных двигателях, позволили сделать вывод о том, что показатели качества выходного напряжения, создаваемого электромагнитной системой двигателя с фазным ротором, выше, чем у трансформатора, выполненного на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;

– методические подходы в технико-экономическом обосновании постановки на серийное производство солнечной фотоэнергетической установки малой мощности и сравнительной их экономической оценки с другими традиционными источниками энергии могут применяться и для обоснования целесообразности применения других видов возобновляемых источников энергии, которые могут использоваться для электроснабжения потребителей электроэнергии с известными их параметрами и режимами работы.

Основные положения, выносимые на защиту:

– критерии оценки эффективности автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки;

– алгоритм работы системы управления автономным инвертором на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем по преобразованию и стабилизации напряжения;

– методика расчета параметров электрической схемы замещения автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем.

– компьютерная модель автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем.

– результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций базируется на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, положения которых нашли применение в работах, созданных автором новых теоретических положений по расчёту показателей оценки эффективности и параметров солнечных автономных инверторов согласованные с известными теоретическими положениями науки, а также совпадением результатов компьютерного и физического моделирования.

Реализация результатов исследований. Материалы по исследованию компьютерной модели и технико-экономического обоснования постановки на серийное производство солнечных фотоэнергетических установок малой мощности переданы в ООО «Солнечный центр» и ООО «Энерготехнологии-Сервис» (приложение А и Б). Результаты научных исследований используются в учебном процессе в КубГАУ по дисциплине «Электрооборудование возобновляемой энергетики» (приложение В).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на двух Всероссийских и шести Международных научно-практических конференциях, в том числе на VIII Всероссийской молодёжной школе с международным участием, г. Москва (2012 г.); IV международной НПК, г. Саратов, СГАУ (2013 г.); международной НПК, г. Ставрополь, СГАУ (2013 г.); V международной НПК, г. Краснодар, КубГАУ (2013 г.); международной НПК, г. Волгоград, ВГАУ (2013 г.); VIII Всероссийской НПК, г. Краснодар, КубГАУ (2014 г.); V международной НПК, г. Чебоксары, ЦНС (2015 г.); VI Международной НПК, г. Уфа (2021 г.)

Личный вклад автора заключается в формулировке общей идеи и цели работы, разработке новых функциональных схем солнечных автономных инверторов на однофазно-трёхфазных трансформаторах с вращающимся магнитным полем, методики инженерного расчёта параметров схемы замещения автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем, блок-схемы компьютерной модели авто-

номного инвертора на трансформаторе с вращающимся магнитным полем, разработке экспериментальной установки и исследовании однофазно-трёхфазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, включая одну статью, размещенную в БД Scopus, 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 монографии. Общий объём публикаций составляет 29 п. л., из которых 11,4 п. л. принадлежит лично автору.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованных источников, включающего 140 наименований и приложения. Общий объём диссертации 127 страниц машинописного текста, включая 37 рисунков и 7 таблиц.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Востребованность солнечных электростанций малой мощности в сельскохозяйственном производстве

По оценкам западных и отечественных специалистов и ученых в области развития солнечной энергетики Солнце станет доминирующим источником энергии на планете Земля к 2100 г. [26, 47, 67, 75, 114, 126].

В настоящее время Россия отстаёт от передовых стран в развитии возобновляемых источников энергии (ВИЭ) из-за низкого уровня развития экономики, а также небольших объемов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в сфере ВИЭ [3, 4, 43, 48]. В России имеются большое количество потребителей энергии, где по экономическим, экологическим и социальным условиям приоритетным является развитие ВИЭ. К ним относятся прежде всего сельскохозяйственные потребители малых фермерских (МФХ) и личных подсобных хозяйств (ЛПХ), удаленные от внешних энергетических систем [24, 52, 56, 95, 109, 127]. К таким потребителям относятся малые фермерские хозяйства, занимающиеся производством мёда, мяса, шерсти, рыбы. Солнечные электростанции могут применяться в качестве зарядных устройств беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающих мониторинг земель и точное разбрасывание удобрений. Таким образом, актуальным сегодня является направление применения автономных солнечных электростанций для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей электроэнергии, задействованных в технологических процессах и обеспечивающих комфортные условия обслуживающего персонала [24, 86].

С годами улучшаются технологии изготовления и, уменьшается соответственно, стоимость солнечных фотоэлементов, поэтому в ближайшее время солнечная энергетика станет конкурентоспособной с традиционными источниками энергии [53, 110, 116, 132].

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года предусматривает компенсацию государственных затрат на присоединение возобновляемых источников энергии, в том числе солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС), к сети мощностью менее 25 МВт, что по прогнозам увеличит долю выработки электроэнергии возобновляемыми источниками к 2030 году до 7 %. Сегодня общий объем производства солнечных батарей в России составляет более 5 МВт в год. Однако в настоящее время доля солнечной электрогенерации в России очень мала. К примеру, сегодня в Германии она составляет 10 ГВт в год.

Таким образом, освоение и использование местных традиционных и возобновляемых энергетических ресурсов позволит многие регионы страны, прежде всего сельскохозяйственное производство, перевести на надежное и качественное энергообеспечение, при этом обеспечив их энергетическую независимость [6, 52, 56].

Краснодарский край является перспективным регионом для внедрения солнечной энергетики. Анализ среднемесячной облачности и среднемесячного прямого излучения солнца показал, что больше 50 % времени в году в Краснодарском крае средняя облачность не превышает 45 %, при этом среднемесячное прямое излучение солнечной энергии на большей части территории превышает 1,2 кВт/м² [21, 69, 70].

Доля потребителей электроэнергии в сельскохозяйственном производстве в 2010 г. не превышала 3,5 %. Сегодня их доля уже превышает 6 %, т. е. за 10 лет в 2 раза выросло количество потребителей электроэнергии, а это говорит о высоких темпах электрификации, включая автоматизацию сельскохозяйственного производства. При этом, если рассматривать структуру потребления электроэнергии разными потребителями в сельскохозяйственном производстве, то около 40 % – это холодильники и холодильные установки, 20 % – электропривод, 15 % – осветительная нагрузка, остальная нагрузка

приходится на потребителей электроэнергии, обеспечивающие жизнедеятельность обслуживающего персонала [56, 63, 86].

Значительные темпы за последние годы зафиксированы в развитии рыбоводства в России и Краснодарском крае. При этом Краснодарский край находится в наиболее благоприятном регионе для развития объектов прудового рыбоводства. Общая площадь водоёмов края превышает 60 тыс. га. Как известно, выход товарной рыбы зависит прежде всего от качества и объема живого корма, состав которого разнообразен.

Электрооптические преобразователи применяются для привлечения и уничтожения насекомых, идущих на корм рыбам. Основным конструктивным элементом их является высоковольтная сетка. Мощность высоковольтной сетки находится в пределах от 15 до 250 Вт, номинальное напряжение 220 В.

Для обогащения воды кислородом в рыбоводных прудах применяются аэрационные установки. Механические аэраторы конструктивно представляют собой вращающиеся вокруг горизонтальной или вертикальной оси барабаны с лопастями. В качестве привода в аэрационных установках применяются различные типы погружных насосов напряжением 220 В, мощность которых в основном находится в пределах от 300 до 1500 Вт. Общая мощность потребителей электроэнергии прудового хозяйства с осветительной нагрузкой не превышает 3 кВт [82, 86].

Проведенный анализ показал, что большинство прудовых хозяйств находятся вдали от линий электропередачи, при этом рентабельность производства в основном определяется затратами на проведение воздушной или кабельной линии электропередачи к производственным мощностям. Анализ схем расположения прудовых хозяйств до централизованных линий электропередачи в Краснодарском крае показал, что это расстояние может быть от 1 до 5 км. В качестве автономных источников электроэнергии прудовых хозяйств могут применяться бензоэлектростанции. Однако ресурс их работы

в зависимости от мощности и конструктивных решений не превышает 1500 ч (два месяца). Ресурс работы дизельных электростанций (ДЭС) значительно превышает ресурс работы бензоэлектростанций, однако они дороже и, кроме того, при малых мощностях с экономической точки зрения применение ДЭС невыгодно. Таким образом, хорошие перспективы для использования в качестве источника электроэнергии прудового рыбоводства раскрываются перед солнечными фотоэнергетическими установками (СФЭУ).

Еще одно направление, где активно начали применяться потребители электроэнергии – это пчеловодство и прежде всего кочевые пасеки. Как известно, к основным физическим показателям, обеспечивающим физиологическое состояние пчелиных семей, относятся: температура, влажность, концентрация кислорода и углекислого газа в гнезде пчёл. Круглосуточный контроль и поддержание номинальных значений этих параметров позволяют нормально развиваться пчелиным семьям, что оказывает существенное значение на производительность мёда и его качество. Без специализированного электрооборудования рассмотренные технологические процессы решить невозможно.

Топливные автономные электростанции не могут применяться в качестве источников электроэнергии потребителей кочевых пасек из-за вредных выбросов и шума. Здесь могут применяться СФЭУ небольшой мощности. Профессиональные пчеловоды на больших пасеках используют электронное оборудование для определения лётной активности пчёл, используя автоматический счётчик движения, оснащенный инфракрасным приёмником и излучателем. Потребляемая мощность такого оборудования не превышает 500 Вт. Мощность приводного двигателя медогонки, предназначенной для откачки мёда из сотовых рамок, составляет 90 Вт, номинальное напряжение 12 В. Важным оборудованием является сушилка для пыльцы, предназначенная для удаления влаги, а также обеспечивающая защиту от воздействия грибка и вредных микроорганизмов. Основные технические данные сушилки: напря-

жение 220 В, номинальная потребляемая мощность 500 Вт, частота тока 50 Гц.

Для обеспечения жизнедеятельности обслуживающего персонала кочевых пасек могут применяться бензоэлектростанции и (или) дополнительные солнечные батареи СФЭУ и (или) энергоэффективные ветроэнергетические установки (ВЭУ) с вертикальной осью вращения. Аккумуляторные батареи применять невыгодно из-за высокой их стоимости и необходимости повышения установленной мощности СФЭУ для их заряда [83, 84, 92].

Таким образом, общая мощность источников электроэнергии передвижных пасек не превышает 6 кВт. При этом эти источники работают не одновременно, а резервируют друг друга.

СФЭУ могут применяться в качестве источника электроэнергии генератора высоковольтных импульсов электрической изгороди (электропастуха). Как известно, электрическая изгородь применяется для ограничения передвижения животных (крупного рогатого скота, лошадей, коз, овец и т.п.) на пастбищах. Мощность генераторов высоковольтных импульсов не превышает 600 Вт, а мощность СФЭУ, обеспечивающих дополнительно заряд аккумуляторных батарей, являющихся источником электроэнергии для изгороди в ночной время или в пасмурную погоду, составляет около 1,5 кВт.

Для обеспечения удобства работы, в том числе повышения производительности, сегодня широко для стрижки овец и других животных применяются стригальные машинки с частотой тока 200 Гц, кроме того, есть и ручной электрорезащий инструмент, который также работает на частоте 200 Гц. Повышенная частота тока источника питания значительно улучшает массогабаритные показатели потребителей электроэнергии, которым является электропривод. Дополнительным устройством, обеспечивающим работу рассмотренных потребителей электроэнергии, является преобразователь частоты, входное напряжение которого 380/220 В, частота тока 50 Гц, выходная

частоты тока 200 Гц. Применение преобразователей частоты ухудшает технико-экономические показатели автономного источника электроэнергии.

Широко используются в малых фермерских и личных подсобных хозяйствах также трёхфазные потребители электроэнергии небольшой мощности – дробилки, погружные насосы, электропривод вентиляторов, точильный агрегат для заточки режущих пар стригальных машин и т.п., для регулирования частоты вращения которых требуется пониженная частота тока. Здесь также в качестве дополнительных устройств применяются преобразователи частоты.

Важным является тот факт, что преобразователи частоты генерируют трёхфазную систему квазисинусоидального напряжения, что отрицательно сказывается на работе электрических машин (приводит к нагреву электрических машин, понижению крутящего момента и в итоге понижается КПД).

Кроме того, в настоящее время также возникают проблемы с зарядом аккумуляторных батарей беспилотных летающих аппаратов (дронов), осуществляющих мониторинг земель и точное разбрасывание удобрений. Здесь также могут применяться транспортные СФЭУ небольшой мощности.

В соответствии с Федеральным законом № 112-ФЗ «О личном подсобном хозяйстве» (с последующими изменениями) важно, что владелец ЛПХ освобождается от уплаты налогов в случае реализации излишков продукции, полученной на своем участке, который не должен превышать 0,5 га. У владельцев ЛПХ нет никаких ограничений на инструменты, применяемые при работе – всё на усмотрение самого работника. В качестве участка для ЛПХ могут использоваться полевые участки, на которых любое строительство запрещено, в этом случае применение СФЭУ для электроснабжения потребителей электроэнергии становится актуальным.

Проведённый анализ энергетических показателей и режимов работы, рассмотренных потребителей электроэнергии МФХ и ЛПХ показал, что это в основном потребители электроэнергии переменного тока, причём, одно-

фазного и трёхфазного напряжения промышленной частоты, а также некоторые потребители работают на повышенной частоте тока (электропривод стригальных машин) и пониженной частоте тока, необходимой для регулирования частоты вращения электропривода дробилок, погружных насосов, электрорежущих и сверлильных инструментов. Единичная мощность потребителей МФХ и ЛПХ не превышает 1,5 кВт, длительность работы в сутки большинства из них не превышает 2–3 часа. Важно, что активное потребление мощности происходит в летний сезон.

Современные потребители электроэнергии МФХ и ЛПХ предъявляют следующие основные требования к источникам электроэнергии:

- мощность автономного источника должна находиться в пределах от 3 до 5 кВт;
- обеспечивать высокое качество выходного напряжения для однофазных и трёхфазных автономных потребителей электроэнергии;
- обеспечивать потребители переменным током промышленной частоты и переменным током пониженной, регулируемой частоты (для регулирования частоты вращения электропривода) и повышенной частотой тока (для обеспечения электроэнергией высокочастотных потребителей электроэнергии).

Таким образом, перспективным является направление применения СФЭУ для электроснабжения автономных сельскохозяйственных потребителей МФХ и ЛПХ, при этом значительно повышается востребованность СФЭУ с точки зрения технико-экономических показателей, если потребители электроэнергии удалены от внешней энергетической системы. Однако для улучшения эксплуатационно-технических характеристик автономного источника электроэнергии необходимо разработать СФЭУ, отвечающую современным требованиям потребителей электроэнергии МФХ и ЛПХ, прежде всего такие станции должны быть многофункциональными.

1.2 Особенности конструкции и работы автономных солнечных фотоэнергетических установок

На рисунке 1.1 приведена типовая структурная схема СФЭУ. Принцип работы её основан на физическом эффекте прямого преобразования солнечной радиации (излучения) в электрическую энергию, используя фотоэлементы. В состав СФЭУ, кроме фотопреобразователей – солнечных батарей (СБ), как правило, входят следующие основные функциональные элементы: автономный инвертор (АИ), осуществляющий преобразование напряжения постоянного тока, вырабатываемое СБ, в напряжение переменного тока, аккумуляторные батареи (АБ) – накопители электроэнергии, зарядное устройство (ЗУ), контроллер (К), выполняющий функцию системы управления и защиты, в том числе контроль параметров электроэнергии и перекоммутацию электрических цепей. На рисунке 1.1 показана также нагрузка (Н) [73, 74, 90].

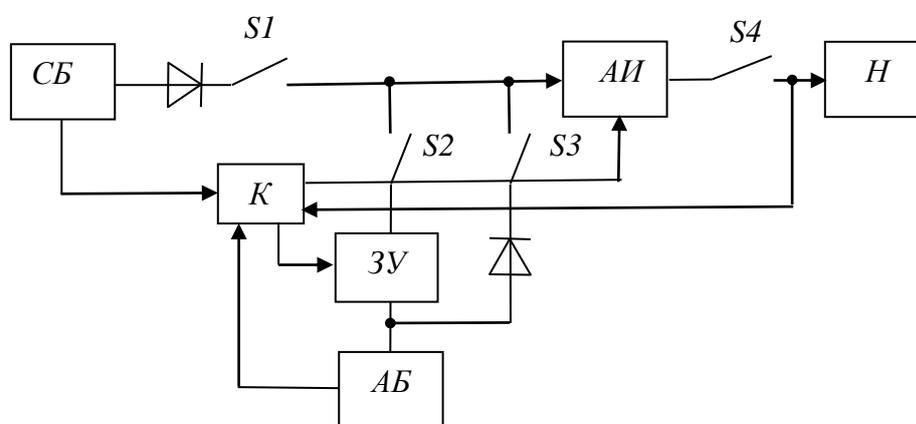


Рисунок 1.1 – Структурная схема солнечной фотоэнергетической установки

Входное напряжение постоянного тока АИ составляет 12, 24 или 48 В, кроме преобразования напряжения инвертор осуществляет функцию стабилизации выходного напряжения. СБ представляют собой группы последовательно-параллельных включенных фотоэлементов, как правило, общей площадью 1,5 м². Мощность СБ такой площади составляет 400–500 Вт. Для уве-

личения установленной мощности СФЭУ солнечные батареи подключаются между собой параллельно.

Сегодня в России разработаны и внедрены технические решения автономных стационарных (портативных) и мобильных солнечных электростанций (рисунок 1.2) мощностью от 200 Вт до 5 кВт.



б)

Рисунок 1.2 – Стационарные портативные (а) и мобильные (б) СФЭУ серии МФС12, МФС24 и МФС48

Портативные солнечные электростанции (рисунок 1.2, а) обычно имеют небольшую мощность – несколько сот ватт. Являются источниками напряжения постоянного тока. Для резервного электроснабжения применяет-

ся предварительно заряженная аккумуляторная батарея ёмкостью от 50 до 75 А/ч.

Мобильные солнечные электростанции (рисунок 1.2, б), как правило, в своём составе имеют:

- многокристаллические солнечные батареи Yingli по 275 Вт (для обеспечения потребителей электроэнергией с суммарной мощностью 5 кВт необходимо около 20 таких батарей);

- гелевые GST Volta 200 А/ч или литий-ионные аккумуляторные батареи 100 А/ч (от 2 до 4 шт);

- однофазный инвертор мощностью до 5 кВт или трёхфазный инвертор мощностью от 5 до 9 кВт;

- контроллер заряда аккумуляторных батарей МРРТ;

- комплект наклонного крепления солнечных батарей, кабели и другие монтажные приспособления;

- двухколесный прицеп грузоподъемностью до 500 кг.

Стоимость мобильных СФЭУ зависит от мощности станции, а также комплектующих функциональных элементов (солнечных батарей, инвертора, контроллера, аккумуляторных батарей, прицепа, монтажного оборудования) и для мощности 3–5 кВт находится в пределах от 150 до 400 тыс. руб.

Основными преимуществами рассмотренных технических решений СФЭУ являются:

- автономность и независимость от внешней энергосистемы;

- отсутствие потребности в специальных помещениях;

- удобство при транспортировке и обслуживании;

- длительный срок службы основного функционального элемента – солнечных батарей (от 25 лет).

Основные недостатки рассмотренных СФЭУ:

– портативные стационарные системы (рисунок 1.2, а) в основном являются источниками напряжения постоянного тока и применяются для обеспечения электроэнергией активной нагрузки;

– электроэнергией переменного тока обеспечиваются только однофазные потребители промышленной частоты, с этой целью в составе станции применяются однофазные автономные инверторы в основном с квазисинусоидальным выходным напряжением;

– для электроснабжения потребителей электроэнергией с повышенной или пониженной частотой тока дополнительно применяются преобразователи частоты, которые также генерируют напряжение квазисинусоидальной формы, что значительно ухудшает эксплуатационные и технико-экономические показатели автономного источника электроэнергии.

Таким образом, источником основных недостатков СФЭУ является автономный инвертор, поэтому для улучшения эксплуатационно-технических характеристик СФЭУ необходимо улучшить ЭТХ и повысить функциональные возможности АИ.

1.3 Автономные инверторы солнечных электростанций

Основным функциональным элементом СФЭУ является солнечный автономный инвертор (АИ), основная функция которого – осуществлять преобразование напряжения постоянного тока в повышенное напряжение переменного тока, требуемого для потребителей электроэнергии. Величина напряжения постоянного тока это, как правило, 12, 24 или 48 В, а переменного тока 220 В – в однофазном и 380 В – в трёхфазном исполнении [16, 72, 73].

АИ оказывают существенное влияние на эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ) и энергетические характеристики солнечной фото-энергетической установки. В настоящее время они не отвечают современным требованиям, предъявляемые потребителями электроэнергии МФХ и ЛПХ,

поскольку в основном генерируют напряжение постоянного тока или однофазное напряжение, в больших случаях квазисинусоидальной формы [40, 41, 73].

Сегодня известны много технических решений силовых схем АИ, в том числе, осуществляющих стабилизацию напряжения, генерирующих однофазную и трёхфазную систему напряжений, а также ток повышенной частоты. Для того чтобы разработать энергоэффективный АИ для мобильной солнечной фотоэнергетической установки, необходимо провести анализ особенностей конструкции, работы и недостатков известных технических решений автономных инверторов, а также рассмотреть перспективную элементную базу и на основе этого анализа разработать новое техническое решение энергоэффективного преобразователя напряжения постоянного тока в переменный.

Важным функциональным элементом силовой электронной схемы АИ является полупроводниковый прибор. Особенностью работы этих приборов является ключевой режим работы. Все шире в составе силовых электронных схем АИ применяются вместо биполярных транзисторов полевые транзисторы, имеющие следующие основные преимущества: повышенное быстродействие; малые потери энергии в открытом состоянии; устойчивость работы при изменении температуры; простота изготовления; улучшенные массогабаритные показатели. Все эти преимущества в комплексе улучшают в целом эксплуатационно-технические и энергетические показатели АИ.

Структурно-схемные решения силовых электронных схем с широким применением полевых транзисторов практически не изменились. Поэтому в настоящее время используются однофазные мостовые схема АИ напряжения. Один из вариантов такой схемы приведён на рисунке 1.3, *а*. Однофазная схема инвертора, выполненная на двух полевых транзисторах приведена на рисунке 1.3, *б*. На рисунках 1.3, *а* и *б* показана только первичная обмотка трансформатора).

Основными элементами силовой схемы АИ являются полевые транзисторы VT , обратные диоды, включенные встречно-параллельно транзисторам, защищают транзисторы от перенапряжений, трансформатор T , предназначенный, как правило, для повышения напряжения, и входной конденсатор C , выполняющий функцию входного фильтра и осуществляет защиту источника электроэнергии от скачков напряжения, возникающих при коммутации силовых электронных приборов. Поочередная работа полевых транзисторов $VT1$, $VT4$ и $VT2$ $VT3$ (рисунок 1.3, а), $VT1$ и $VT2$ (рисунок 1.3, б) приводит к изменению направления тока, протекающего по первичной обмотке трансформатора T . В результате постоянный ток источника напряжения, преобразуется в переменный ток.

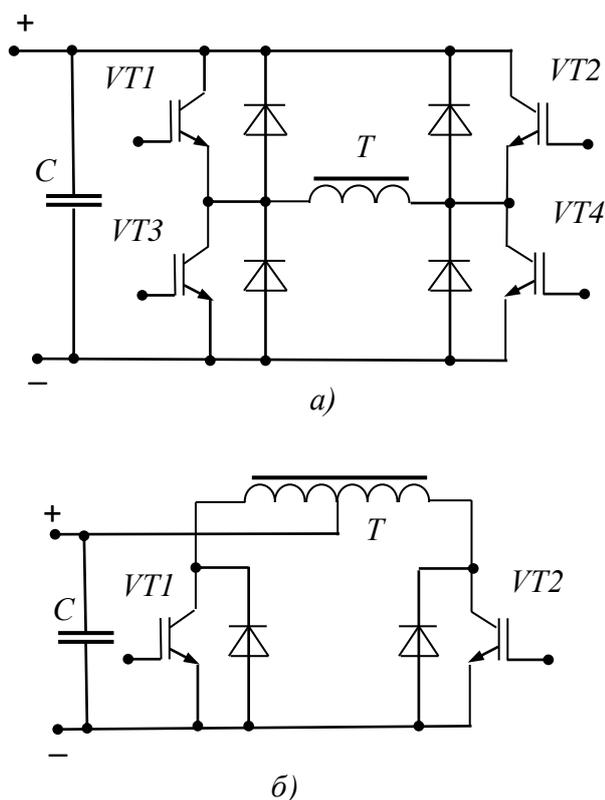


Рисунок 1.3 – Принципиальные силовые электрические схемы однофазных автономных инверторов

Величина входного напряжения постоянного тока может быть равна 12, 24 или 48 В, выходное напряжение переменного тока равно 220 В, если АИ однофазный и 220/380, если АИ трёхфазный.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) выходного напряжения, обеспечивает относительно высокое его качество. Схемы имеет простое техническое решение системы управления, которая стабилизацию напряжения осуществляет за счет изменения длительности паузы между положительной и отрицательной полуволной выходного напряжения. Основными недостатками мостовой схемы АИ (рисунок 1.3, а) являются относительно низкий КПД и показатели надежности, за счет применения 4-х транзисторов, а при необходимости увеличения установленной мощности АИ, транзисторы силовой схемы включаются на параллельную работу, что приводит к понижению КПД и надежности работы преобразователя.

Повышенные показатели надежности и КПД имеет схема АИ, показанная на рисунке 1.3, б, однако основным её недостатком является повышенная масса согласующего трансформатора, имеющего практически две первичные обмотки.

Общим недостатком, рассмотренных однофазных схем АИ является то, что для получения трехфазной симметричной системы напряжений, необходимо применять три схемы однофазных инверторов и сложную систему управления, обеспечивающую синхронизацию их работы, как по сдвигу напряжений друг относительно друга на угол 120° , так и по пофазной их стабилизации [50, 51].

На рисунке 1.4 приведена схема трехфазная мостовая схема АИ. На схеме не показан трехфазный трансформатор, первичные обмотки которого, в том числе нагрузка Z , могут быть включены по схеме «звезда» или «треугольник».

Достоинством трёхфазной схемы АИ является её простота, в том числе высокие показатели надежности и КПД, а основным недостатком – низкий

диапазон стабилизации напряжения, что не позволяет работать схеме даже при незначительной несимметрии нагрузки.

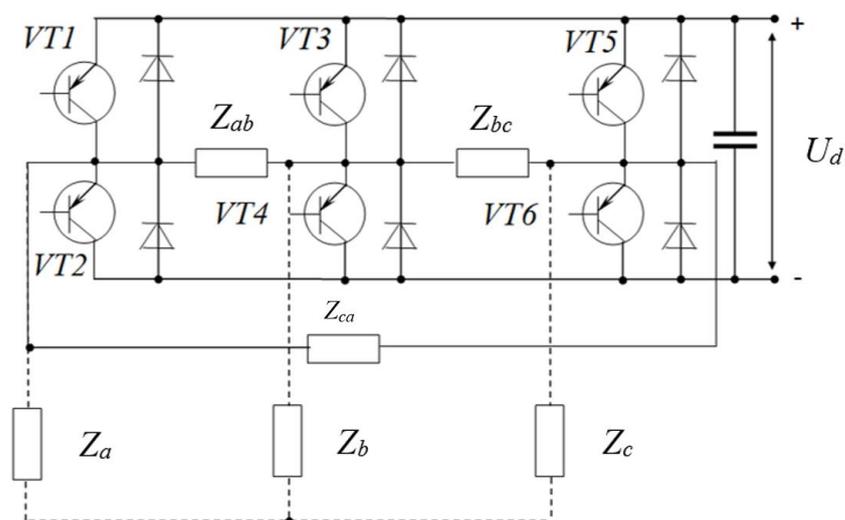


Рисунок 1.4 – Трехфазная мостовая схема инвертора

Одним из эффективных способов улучшения массогабаритных показателей автономных инверторов, что важно для мобильных автономных систем электроснабжения, применение высокочастотного промежуточного преобразования. В этом случае в составе АИ применяется непосредственно высокочастотная схема преобразования напряжения постоянного тока в переменный и реверсивный выпрямитель, понижающий частоту до промышленного уровня. Такое техническое решение АИ, позволяет в несколько раз уменьшить массогабаритные показатели трансформатора инвертора [41, 45].

На рисунке 1.5 приведена функциональная схема АИ на реверсивном выпрямителе, где высокочастотный инвертор и реверсивный выпрямитель, выполнены на биполярных транзисторах VT1 и VT2, VT4 и VT6 соответственно. На рисунке 1.5 не показана схема системы управления и защиты, работа которой синхронизирована с силовой схемой СС и реверсивным выпрямителем.

Входной фильтр Ф1, предназначен для снижения коммутационных перенапряжений, возникающих во время коммутации транзисторов VT1 и VT2

силовой схемы *СС*, осуществляющей преобразование напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока повышенной частоты (u_{11} – положительная полуволна; u_{12} – отрицательная полуволна). Трансформатор *T* повышает напряжения до уровня, требуемого потребителям электроэнергии. Реверсивный выпрямитель *PВ* преобразует напряжение повышенной частоты тока u_{21} и u_{22} (рисунок 1.6) в напряжение промышленной частоты $u_{вых}$, требуемого качества, получаемого после выходного фильтра $\Phi 2$. При этом транзисторы *VT3* и *VT4* формируют положительную полуволну выходного напряжения, а транзисторы *VT5* и *VT6* – отрицательную полуволну.

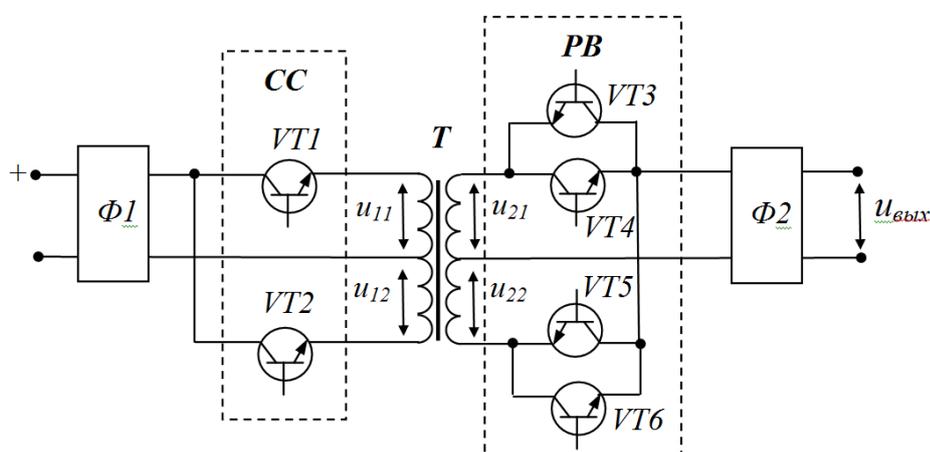


Рисунок 1.5 – Автономный инвертор на реверсивном выпрямителе:
 $\Phi 1$ и $\Phi 2$ – входной и выходной фильтр; *СС* – силовая схема; *T* - трансформатор;
PВ – реверсивный выпрямитель

Основным достоинством, рассмотренной схемы АИ с промежуточным высокочастотным преобразованием (рисунок 1.5) является небольшая масса и габариты, поскольку уже при частоте промежуточного преобразования 800 Гц масса трансформатора уменьшается более чем в 10 раз. Основным недостатком схемы является небольшая мощность, как правило, не превышающая 2–2,5 кВт, поскольку при увеличении промежуточной частоты тока увеличивается уровень электромагнитных помех, создаваемых силовыми электронными приборами во время коммутации. Кроме того, значительно пони-

жается КПД трёхфазной системы, если использовать три однофазных инвертора на реверсивных выпрямителях для получения трёхфазного источника напряжения переменного тока. В этом случае не рекомендуется, чтобы установленная мощность трёхфазного инвертора не превышала 5–7 кВт [40, 41]. Однако эта мощность является предельной суммарной мощностью многих МФХ.

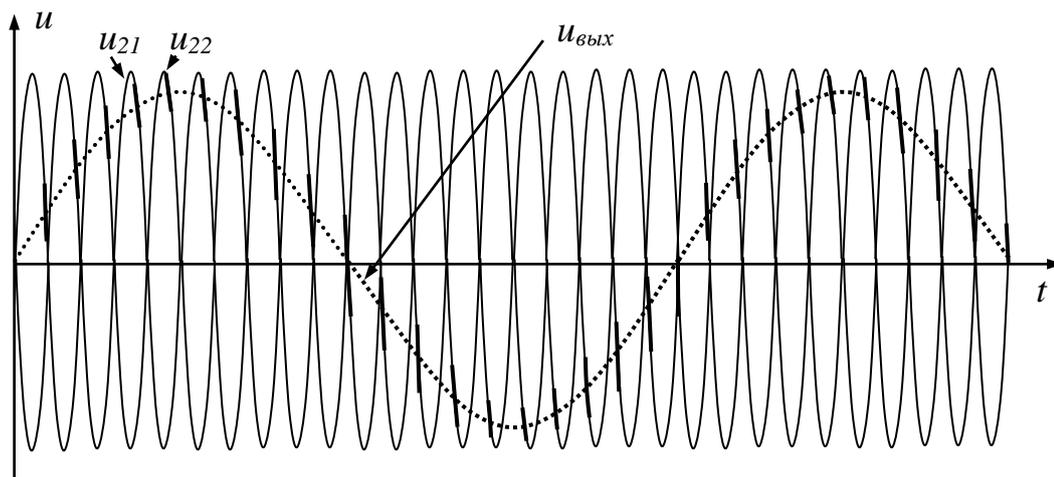


Рисунок 1.6 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы автономного инвертора на реверсивном выпрямителе

Для выбора энергоэффективного структурного решения АИ, для применения в составе мобильных СФЭУ, необходимо разработать критерии оценки эффективности структурно-схемных решений инверторов. Кроме того, при разработке АИ необходимо использовать современные технические достижения в разработке основных функциональных элементов преобразователя. Одним из перспективных направлений, позволяющим улучшить энергетические и эксплуатационно-технические характеристики АИ и СФЭУ в комплексе, является разработка структурно-схемных АИ на базе однофазной схемы преобразования и однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП), а также разработка алгоритма работы системы управления преобразователем в нескольких режимах работы (с гене-

рацией тока промышленной и повышенной частоты), выполненной с использованием микропроцессорной техники [19, 37, 53].

Сегодня основными направлениями улучшения эксплуатационно-технических и энергетических характеристик АИ является применение в их структуре новой элементной базы, в том числе вместо биполярных полевых транзисторов. Оценка эффективности АИ проводится в основном только по двум показателям: стоимость и качество выходного напряжения [20, 50, 124]. Для повышения объективности оценки эффективности АИ необходимо проводить их оценку также по энергетическим показателям КПД, а также по значениям активной, реактивной и полной мощности, величина которых изменяется в зависимости от режима работы преобразователя. Кроме того, для транспортных систем важными являются массогабаритные показатели.

1.4 Выводы и задачи исследований

Краснодарский край является перспективным регионом для внедрения солнечной энергетики в сельскохозяйственное производство.

В настоящее время для электроснабжения автономных сельскохозяйственных потребителей МФХ и ЛПХ, занимающихся производством мёда, мяса, шерсти, рыбы, а также для обеспечения комфортных бытовых условий обслуживающему персоналу, применяются бензо- или дизельные станции, имеющие низкие технико-экономические показатели, в том числе небольшой ресурс работы. Кроме того, также возникают проблемы с зарядом аккумуляторных батарей беспилотных летающих аппаратов, осуществляющих мониторинг земель и точное разбрасывание удобрений. Здесь широкие перспективы раскрываются перед СФЭУ, важным функциональным элементом которых является солнечный АИ напряжения, который, кроме функции преобразования электроэнергии постоянного тока в переменный, выполняет функ-

цию стабилизатора напряжения. ЭТХ автономных инверторов оказывают существенное влияние на характеристики СФЭУ в комплексе.

Проведён анализ особенностей работы и основных эксплуатационно-технических характеристик известных технических решений АИ. Раскрыты основные их недостатки, заключающиеся в относительно низких показателях КПД и надежности, небольшой диапазон стабилизации напряжения (для трёхфазных инверторов). АИ на реверсивных выпрямителях значительно улучшают массогабаритные показатели АИ, но они могут эффективно использоваться на небольших мощностях. Кроме того, все типы инверторов, применяемых в составе автономных мобильных солнечных энергосистем, являются источниками однофазного напряжения промышленной частоты тока.

Научная проблема. Сегодня всё большее применение находят возобновляемые источники энергии в различных отраслях. Однако их широкому применению для электроснабжения потребителей электроэнергии МФХ и ЛПХ препятствует ограниченность функциональных возможностей и отсутствие соответствующих критериев оценки эффективности, в том числе солнечных фотоэнергетических установок.

Рабочая гипотеза состоит в том, что применение однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем и микропроцессорной системы управления позволит обеспечить требуемое качество электроэнергии, расширить функциональные возможности автономного инвертора и улучшить эксплуатационно-технические характеристики солнечной фотоэнергетической установки в комплексе.

Целью диссертационного исследования является улучшение эксплуатационно-технических характеристик и функциональных возможностей автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки.

Для достижения поставленной цели исследований определены **задачи исследований:**

1. Разработать критерии оценки эффективности автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки.
2. Разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы солнечного автономного инвертора с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками на трансформаторе с вращающимся магнитным полем.
3. Разработать алгоритм работы системы управления автономным инвертором на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем по преобразованию и стабилизации напряжения.
4. Разработать методику расчета параметров электрической схемы замещения и компьютерную модель автономного инвертора на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем.
5. Провести исследования компьютерной модели инвертора и экспериментальные исследования однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем и провести оценку достоверности компьютерного моделирования.
6. Провести технико-экономическое обоснование внедрения солнечной фотоэнергетической установки малой мощности.

2 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СТРУКТУРНО-СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ

2.1 Критерии оценки эффективности автономных инверторов солнечных фотоэнергетических установок

Для выбора энергоэффективного структурно-схемного решения АИ для мобильных СФЭУ необходимо разработать критерии, по которым можно было бы оценивать эти решения на этапе проектирования преобразователя.

Известно, что в структуру АИ кроме силовой электронной схемы преобразования, которая может быть выполнена в однофазном или трехфазном исполнении, входят трансформатор, входной и выходной фильтры.

Одним из критериев оценки эффективности структурно-схемного решения АИ предлагается принять значение КПД. Исходными данными при расчете электрических потерь и соответственно КПД солнечных автономных инверторов являются: мощность и номинальное напряжение нагрузки P_H и U_H соответственно; коэффициент фильтрации фильтра выходного напряжения K_Φ ; коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_H$; частота тока нагрузки f ; напряжение источника питания U_d [44, 49, 123].

Расчет АИ, как правило, начинается с определения значений входного напряжения постоянного тока инвертора и выходного напряжения трансформатора, основная функция которого согласование напряжения источника питания с нагрузкой, а также вторая важная функция – гальваническая развязка между источником и потребителями электроэнергии. Далее определяются электрические параметры повышающего трансформатора (рисунок 2.1), проводится выбор силовых электронных приборов по максимальному значению тока I_{max} и по величине максимального обратного напряжения приложенного $U_{об. max}$.

Максимальное значение коллекторного тока, если силовая электронная схема преобразования инвертора выполнена с использованием биполярных транзисторов, как известно, будет иметь значение для номинального режима при угле управления $\alpha = 0$, при этом, значении коэффициента мощности нагрузки будет равно $\cos\varphi = 1$. С учётом перечисленных фактов максимальное значение тока нагрузки, протекающего через транзистор силовой схемы преобразования инвертора будет определяться по формуле

$$I_{VT\max} = \frac{\sqrt{2}K_T P_H}{U_d}, \quad (2.1)$$

где K_T – коэффициент трансформации трансформатора;

P_H – номинальная мощность инвертора;

U_d – напряжение источника питания постоянного тока.

Максимальное обратное значение напряжения на эмиттер-коллекторном переходе, если в силовой схеме преобразования инвертора применяются биполярные транзисторы, или на истоке-стоке, если в силовой схеме применяются полевые транзисторы, определяется по формуле

$$U_{ЭК} = \sqrt{2}U_d. \quad (2.2)$$

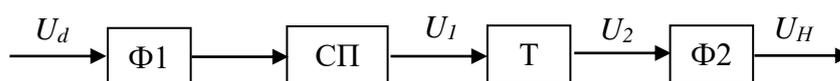


Рисунок 2.1 – Структурная схема автономного инвертора:
 Ф1 и Ф2 – входной и выходной фильтры; СП – схема преобразования;
 Т – трансформатор

Определив значение максимального тока I_{VTmax} и величину обратного напряжения $U_{ЭК}$ выбирается силовой электронный прибор схемы преобразования автономного инвертора. Важным параметром является максимальное среднее значение тока через обратные диоды (рисунок 1.3) значение которого определяется по формуле

$$I_{VD\max} = \frac{\sqrt{2}P_H}{U_d} \sin\left(\frac{\alpha_{\max}}{2} + f_H\right) K_T, \quad (2.3)$$

где α_{\max} – максимальное значение угла управления транзисторами.

Максимальное обратное напряжение на диодах $U_{VD\max} = U_{ЭК}$.

После того когда известны параметры максимального значения тока $I_{VD\max}$ и напряжения $U_{VD\max}$ по справочным данным выбираются обратные диоды.

Для определения КПД силовой схемы АИ, в том числе и его системы управления (СУ) определяются статические и динамические потери в транзисторах и обратных диодах, а также потери электрической энергии в системе управления.

Статические потери на транзисторах

$$\Delta P_{CVT} = m_{VT} U_{ЭК} I_d, \quad (2.4)$$

где m_{VT} – число приборов, включенных одновременно;

$U_{ЭК}$ – прямое падение напряжение на эмиттер-коллекторном переходе, во включенном состоянии;

I_d – ток, протекающий через транзистор.

Приближенно статические потери на диодах можно определить по формуле

$$\Delta P_{CVD} = m_{VD} U_{np} I_d, \quad (2.5)$$

где m_{VD} – число приборов, включенных одновременно;

U_{np} – прямое падение напряжение, во включенном состоянии;

I_d – ток, протекающий через диод.

Динамические потери на транзисторах

$$\Delta P_{DVT} = \frac{\pi}{2} m_{VT} U_{И} I_d f t_{вклVT}, \quad (2.6)$$

где $U_{И}$ – напряжение на выходе инвертора;

$t_{вклVT}$ – время включения транзистора.

Динамические потери на диодах

$$\Delta P_{DVD} = \frac{\pi}{2} m_{VD} U_{II} I_d f t_{вклVD}, \quad (2.7)$$

где $t_{вклVD}$ – время включения транзистора.

Потери в системе управление, как правило, не превышают 3 % поэтому на этапе проектирования они определяются по формуле

$$\Delta P_{CY} = 0,03 P_{II}, \quad (2.8)$$

где P_{II} – мощность инвертора.

Таким образом, КПД инвертора

$$\eta_{II} = \frac{\Delta P_C}{\Delta P_C + P_{II}}, \quad (2.9)$$

где $\Delta P_C = \Delta P_{CVT} + \Delta P_{CVD} + \Delta P_{DVT} + \Delta P_{DVD} + \Delta P_{CY}$ – суммарные потери.

Важным критерием оценки эффективности АИ мобильных солнечных энергетических систем является оценка их массогабаритных показателей. Масса силовых электронных приборов инвертора определяется после выбора транзисторов и обратных диодов, а также их охладителей по формуле

$$G_{II} = 4K_K (G_{VT} + G_{VD}), \quad (2.10)$$

где $K_K = 1,1-1,2$ – конструктивных коэффициент, учитывающих массу корпуса и крепежных деталей;

G_{VT} – масса транзистора с охладителем;

G_{VD} – масса диода с охладителем.

Массогабаритные показатели трансформатора, традиционного исполнения определяются по методике, предложенной в [63], а трансформатора с вращающимся магнитным полем по методике предложенной в [61].

Массогабаритные показатели выходного и входного фильтров АИ определяются по справочным данным после определения индуктивности и емкости фильтров. При этом, для расчёта выходного фильтра АИ задаются

необходимым значением коэффициента гармоник K_G . Зависимость параметров выходного Г-образного LC-фильтра автономного инвертора от коэффициента гармоник K_G определяется неравенством

$$L_\phi C_\phi \geq \frac{T_K^2}{64K_G}, \quad (2.11)$$

Массогабаритные показатели выходных фильтров инвертора зависят также от значения коэффициента K_i , характеризующий отношение максимального и номинального тока нагрузки

$$K_i = \frac{I_{\max}}{I_H}. \quad (2.12)$$

Для скважности импульсов $\lambda = 0,5$

$$K_i = 1 + \frac{0,25E_{\max}}{2f_K L_\phi I_H}, \quad (2.13)$$

где E_{\max} – максимальное значение ЭДС источника питания инвертора;

f_K – частота коммутаций транзисторов.

С учётом, рассмотренных формул при расчете индуктивности выходного фильтра инвертора необходимо чтобы выполнялось условие

$$L_\phi \geq \frac{0,25E_{\max}}{(0,4...0,6)f_K I_H}. \quad (2.14)$$

Далее определяется емкость выходного фильтра инвертора по (2.11).

Полученные значения L_ϕ и C_ϕ проверяются на соответствие требованиям по ограничению динамических отклонений по условию

$$\Delta I_H \sqrt{\frac{L_\phi}{C_\phi}} \leq \Delta U_{H\max}, \quad (2.15)$$

где ΔI_H – максимальный коммутирующий ток нагрузки;

$\Delta U_{H\max}$ – допустимое максимальное отклонение напряжения на нагрузке.

Если условие (2.15) не выполняется, то, проводится перерасчет параметров фильтра, в этом случае, как правило, увеличивают емкость фильтра C .

Входной фильтр, представляющий собой блок конденсаторов, предназначенный для снижения уровня пульсаций входного напряжения инвертора. Ёмкость входного фильтра (рисунок 1.3) определяется по формуле

$$C_1 \geq \frac{I_H T_K}{2U_{Cm}}, \quad (2.16)$$

где U_{Cm} – амплитудное значение напряжения на конденсаторе.

Важным параметром АИ является качество выходного напряжения. На рисунке 2.2 приведены возможные формы выходного напряжения АИ, получаемые в результате широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Как видно из рисунка 2.2 модулирующие импульсы выходного напряжения АИ являются периодическими функциями с периодом 2π , поэтому для оценки качества выходного напряжения с целью определения параметров выходного фильтра, необходимо определить его гармонический состав, используя ряды Фурье [36, 43].

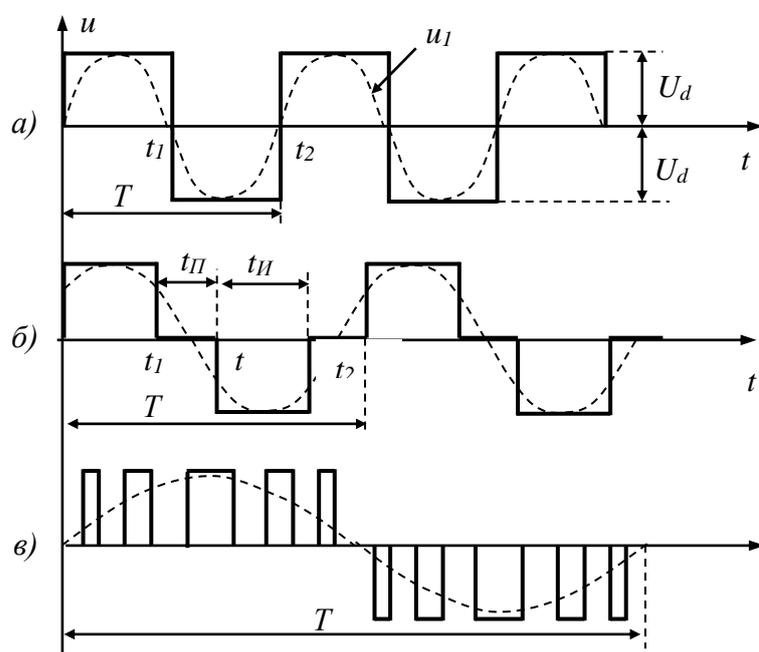


Рисунок 2.2 – ШИМ выходного напряжения на выходе схемы преобразования АИН (рисунок 2.1)

На первом этапе определяются значения коэффициентов ряда Фурье. Значения коэффициентов ряда Фурье зависит от длительности импульсов и паузы между ними, модулирующих выходное напряжение преобразователя (рисунок 2.2).

Коэффициенты ряда Фурье, форма которых показана на рисунке 2.2, а и б, определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{\sin xt_1 - \sin xt_2}{k\pi}, \\ b_k &= -\frac{\cos xt_1 - \cos xt_2}{k\pi}, \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

где $x = k\pi / t$, $t = t_1$ – время, определяемое длительность полпериода (рисунок 2.2, а).

Коэффициенты ряда Фурье выходного напряжения инвертора для формы выходного напряжения АИ, показанной на рисунке 2.2, в определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{1}{k\pi} \sum_{i=1}^n (\sin xt_{i+1} - \sin xt_i), \\ b_k &= -\frac{1}{k\pi} \sum_{i=1}^n (\cos xt_{i+1} - \cos xt_i), \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где n – число импульсов, формирующих период выходного напряжения;
 t_{i+1} и t_i – время, определяемое длительность импульса;
 $x = k\pi / t$, t – время, определяемое длительность полпериода.

В таблице 2.1 приведены зависимости амплитуд высших гармоник от скважности импульса $\lambda = 2t_H / T$ для модулирующих функций показанных на рисунке 2.2, в.

Как видно из таблицы 2.1 на гармонический состав выходного напряжения АИ оказывает существенное влияние скважность импульсов λ . Кроме того, с увеличением номера гармоники их амплитуда увеличиваются с увеличением значения скважности импульса (в таблице 2.1 жирным шрифтом

выделены амплитуды высших гармоник, значение которых превышает амплитуду предыдущей гармоники).

Таким образом, скважность импульсов λ для обеспечения не больших значений амплитуды высших гармоник должна изменяться в пределах от 0,8 до 1, при этом выходной фильтр необходимо настраивать для подавление (в резонанс) с 9-й гармоникой. Для расширения диапазона регулирования напряжения, при значения скважности импульсов λ от 0,6 до 1 выходной фильтр должен быть настроен для подавления 5-й гармоники.

Таблица 2.1 – Зависимость амплитуды высших гармоник выходного напряжения автономных инверторов от скважности импульса λ

λ	Номера гармоник								
	1	3	5	7	9	11	13	15	17
1	1,273	0,424	0,254	0,182	0,141	0,116	0,097	0,085	0,075
0,9	1,257	0,378	0,180	0,083	0,022	0,018	0,044	0,060	0,067
0,8	1,121	0,249	-	0,107	0,134	0,110	0,057	-	0,044
0,7	1,134	0,066	0,180	0,179	0,064	0,053	0,097	0,060	0,012
0,6	1,030	0,131	0,255	0,056	0,114	0,094	0,030	0,085	0,023
0,5	0,900	0,300	0,180	0,128	0,100	0,082	0,069	0,060	0,053
0,4	0,748	0,404	-	0,173	0,083	0,068	0,093	-	0,071
0,3	0,578	0,419	0,180	0,028	0,126	0,103	0,015	0,060	0,074
0,2	0,393	0,343	0,254	0,147	0,044	0,036	0,079	0,084	0,061
0,1	0,199	0,192	0,180	0,162	0,140	0,114	0,087	0,060	0,034

На следующем этапе оценки качества выходного напряжения АИ определяются относительное значение амплитуд высших гармоник выходного напряжения инверторов путем суммирования значений коэффициентов ряда Фурье, с учетом общего количества участков (импульсов и пауз между ними), из которых формируется один период выходного напряжения

$$\left. \begin{aligned} A_{k\Sigma} &= \sum_{k=1, i=1}^{n, m} a_{ki} \\ B_{k\Sigma} &= \sum_{k=1, i=1}^{n, m} b_{ki} \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

где m – число периодически повторяющихся i – х участков, содержащихся в одном периоде выходного напряжения преобразователя;

n – общее число гармоник.

Амплитуда k -й гармоники инвертора определяется по формуле

$$A_k = \sqrt{A_{k\Sigma}^2 + B_{k\Sigma}^2}. \quad (2.20)$$

При расчёте выходных фильтров АИ важным показателем является относительное значение амплитуд высших гармоник, которое определяется по формуле

$$\Delta A_k = A_k / A_1. \quad (2.21)$$

Для количественной оценки качества выходного напряжения АИ применяется коэффициент гармоник, значение которого определяется по формуле

$$K_G = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}}{A_1}, \quad (2.22)$$

где A_1 – амплитуда первой (основной) гармоники;

A_2, A_3, A_4 и т.д. – амплитуды высших гармоник.

Значение коэффициента гармоник K_G необходимо для расчёта параметров выходного фильтра АИ, в соответствии с формулой (2.11).

Важными критерием оценки эффективности автономного инвертора напряжения, кроме КПД, являются энергетическими показателя, которыми являются активная, реактивная и полная мощность. При расчёте параметров выходного фильтра автономного инвертора основным показателем является значение коэффициента гармоник K_G .

Как известно, ШИМ по синусоидальному закону регулирование выходного напряжения реализуется за счёт изменения длительности модулирующих импульсов. Величина выходного напряжения АИ с ШИМ по синусоидальному закону регулируется путём изменения длительности модулирующих импульсов напряжения (рисунок 2.3) [40, 41].

На значение активной, реактивной полной мощности, а также КПД автономного инвертора существенно оказывает влияние значение коэффициента гармоник кривой выходного тока K_G . Величина коэффициента гармоник K_G определяется с учетом того, что полупериод выходного напряжения разбит на i равных по длительности интервала (рисунок 2.3), на каждом из которых формируются равные по длительности импульсы одинаковой амплитуды

$$t_{II} = \frac{\pi\gamma}{i}, \quad (2.23)$$

где γ – угол регулирования величины выходного напряжения.

При $\gamma = 1$ длительность импульса напряжения равна длительности интервала i . В этом случае на выходе инвертора формируется положительная и отрицательная полуволна выходного напряжения прямоугольной формы. Когда $0 \leq \gamma \leq 1$ длительность интервала равна сумме длительностей формируемого импульса и паузы.

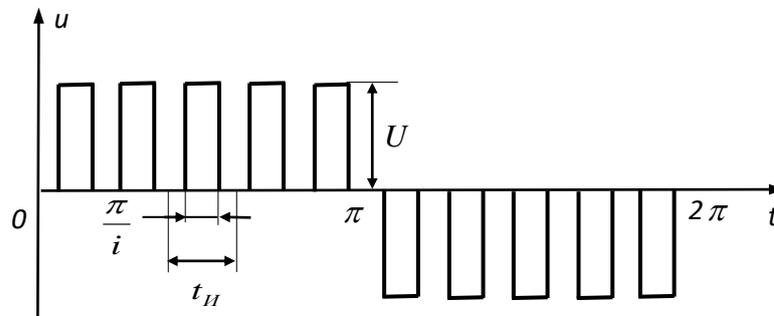


Рисунок 2.3 – Диаграммы ШИМ выходного напряжения

Амплитуды гармоник выходного напряжения АИ с ШИМ по синусоидальному закону для любого числа импульсов могут быть определены из полученного в общем виде выражения

$$U_n = \frac{4U}{\pi n} \sin \frac{\pi n \gamma}{2i} \cos \frac{\pi n}{2i}, \quad (2.24)$$

где U – значение напряжения источника постоянного тока; n – номер гармоники (1, 3, 5, 7 и т.д.); i – число импульсов, формирующих полуволну выходного напряжения.

Действующее значение напряжения является функцией угла регулирования и определяется по формуле

$$U_D = U\sqrt{\gamma}. \quad (2.25)$$

При ШИМ выходного напряжения коэффициенты гармоник, формы и искажения будут определяться по выражениям

$$K_G = \sqrt{\frac{\pi^2 \gamma \sin \frac{\pi}{2i} - 1}{16 \sin^2 \frac{\pi \gamma}{2i}}}; \quad (2.26)$$

$$K_\phi = \gamma^{-\frac{1}{2}}; \quad (2.27)$$

$$K_{иск} = \sqrt{\frac{8}{\pi^2 \gamma} \sin a \frac{1}{\sin b}}, \quad (2.28)$$

где коэффициенты $a = \frac{\pi \gamma}{2i}$; $b = \frac{\pi}{2i}$.

При работе АИ на активно-индуктивную нагрузку, гармонический состав тока нагрузки будет определяться по формуле

$$I_H = \frac{4U}{\pi n R} (1 + n^2 \operatorname{tg}^2 \varphi)^{-\frac{1}{2}} \sin c \frac{1}{\sin d}, \quad (2.29)$$

где R – сопротивление нагрузки; коэффициенты $c = \frac{\pi n \gamma}{2i}$; $d = \frac{\pi n}{2i}$.

Действующее значение выходного тока АИ

$$I_{ВЫХ} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R} \sqrt{\sum_n^\infty (1 + n^2 \operatorname{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\frac{1}{n} \sin c \frac{1}{\sin d} \right]^2}. \quad (2.30)$$

Коэффициент гармоник выходного тока АИ

$$K_{\Gamma_{\text{ВЫЛ}}} = \sqrt{\frac{\sum_n^{\infty} (1 + n^2 \text{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\frac{1}{n} \text{sin} c \frac{1}{\text{sin} b} \right]^2}{(1 + \text{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\text{sin} d \frac{1}{a} \right]^2}} - 1. \quad (2.31)$$

Полная мощность энергии, выделяемая на нагрузке

$$S = \frac{2\sqrt{2}\gamma U^2}{\pi R} \sqrt{\sum_n^{\infty} (1 + n^2 \text{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\frac{1}{n} \text{sin} c \frac{1}{\text{sin} b} \right]^2}. \quad (2.32)$$

Активная мощность

$$P = \frac{8U^2}{\pi^2 R} \sum_n^{\infty} (1 + n^2 \text{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\frac{1}{n} \text{sin} c \frac{1}{\text{sin} b} \right]^2. \quad (2.33)$$

Реактивная мощность

$$Q = \frac{8U^2}{\pi^2 R} \sum_n^{\infty} \frac{\text{tg} \varphi}{n} (1 + n^2 \text{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\frac{1}{n} \text{sin} c \frac{1}{\text{sin} b} \right]^2. \quad (2.34)$$

Коэффициент выделения полезной мощности в нагрузке

$$K_{\text{ПН}} = \frac{(1 + \text{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\text{sin} d \frac{1}{\text{sin} a} \right]^2}{\sum_n^{\infty} (1 + n^2 \text{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[\frac{1}{n} \text{sin} c \frac{1}{\text{sin} b} \right]^2}. \quad (2.35)$$

На рисунках 2.4 показан график зависимости коэффициента гармоник от количества модулирующих импульсов. При значениях модулирующих импульсов $i > 4$ коэффициент гармоник K_{Γ} имеет наименьшие значения. Значение полной мощности S , выделяемой на нагрузке также увеличивается при значениях модулирующих импульсов $i > 4$ (рисунок 2.5).

Графические зависимости активной и реактивной мощности от количества модулирующих импульсов приведены на рисунках 2.6 и 2.7 соответственно.

Таким образом, по результатам графических зависимостей можно сделать вывод о том, что максимальный КПД автономного инвертора, когда он

будет генерировать максимальную активную мощность будет если количество модулирующих импульсов i будет находиться в пределах от 5 до 9.

Особенности расчета главных размеров и объема магнитопровода, электрических потерь и КПД однофазно-трехфазного ТВМП, выполненного на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, приведены в [61]. На основании рассмотренных аналитических выражений по расчёту силовых электронных приборов, электрических фильтров и непосредственно ТВМП, получены графические зависимости КПД и удельной массы однофазных автономных инверторов на однофазно-трёхфазных ТВМП, выполненных на базе асинхронных двигателей с фазным ротором, от мощности, которые приведены на рисунке 2.8.

Получены зависимости КПД и удельной массы АИ на ТВМП при мощностях 3 и 5 кВт при входных напряжениях источника напряжения постоянного тока 24 и 48 В (рисунок 2.8). Как видно из графиков КПД АИ при напряжении 48 В при мощностях преобразователя меньше 3 кВт больше 4–6 %, в сравнении с АИ с входным напряжением 24 В. При мощности от 3 кВт и больше КПД не отличается больше чем на 2 %. Удельная масса АИ при напряжении источника 48 В на 2–3 кг/кВА меньше.

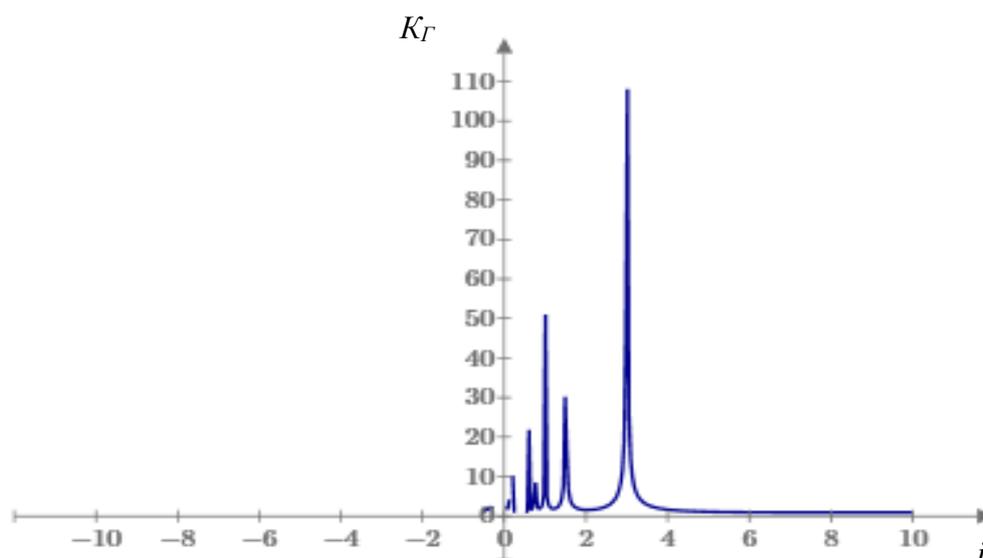


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента гармоник от модулирующих импульсов $K_G = f(i)$

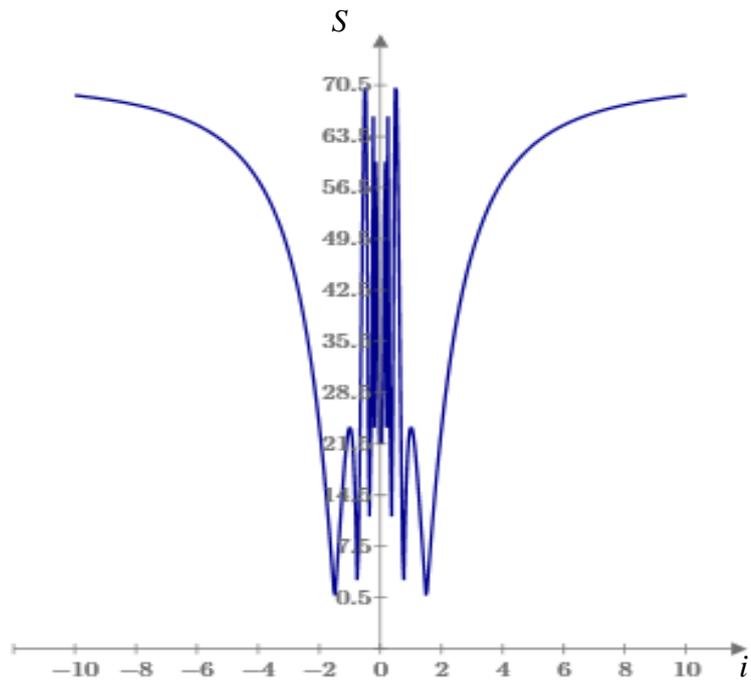


Рисунок 2.5 – Зависимость полной мощности энергии, выделяемой на нагрузке от модулирующих импульсов $S = f(i)$

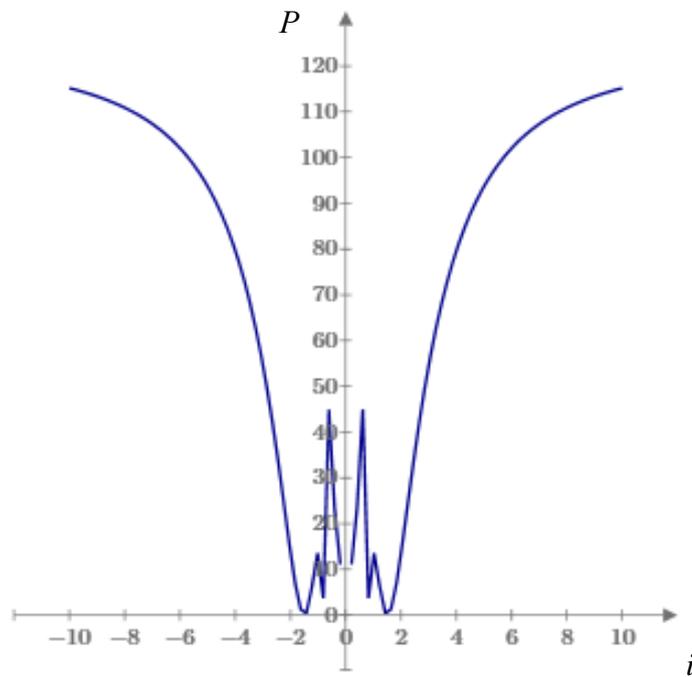


Рисунок 2.6 – Зависимость активной мощности от модулирующих импульсов $P = f(i)$

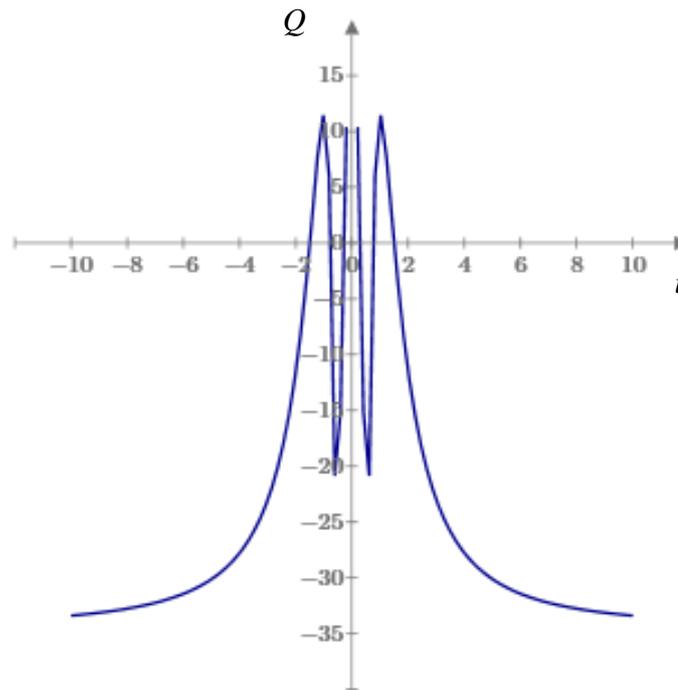


Рисунок 2.7 – Зависимость активной мощности от модулирующих импульсов
 $Q = f(i)$

Таким образом, на массогабаритные показатели АИ оказывает влияние значение коэффициента трансформации K_T и не существенно его значения оказывают влияние на КПД инвертора.

Разработанные критерии оценки эффективности АИ, которые в себя включают показатели КПД, определяемые по результатам расчёта статических динамических потерь в силовых электронных приборах и потерь в системе управления, массогабаритным показателям, включающие показатели расчета силовой электронной схемы, трансформатора, входного и выходного фильтров, показатели качества напряжения, оценивается по величине коэффициента гармоник, показатели активной, реактивной и полной мощности, повысят эффективность выбора и предпроектных работ по разработке новых технических решений преобразователей напряжения постоянного тока в переменный.

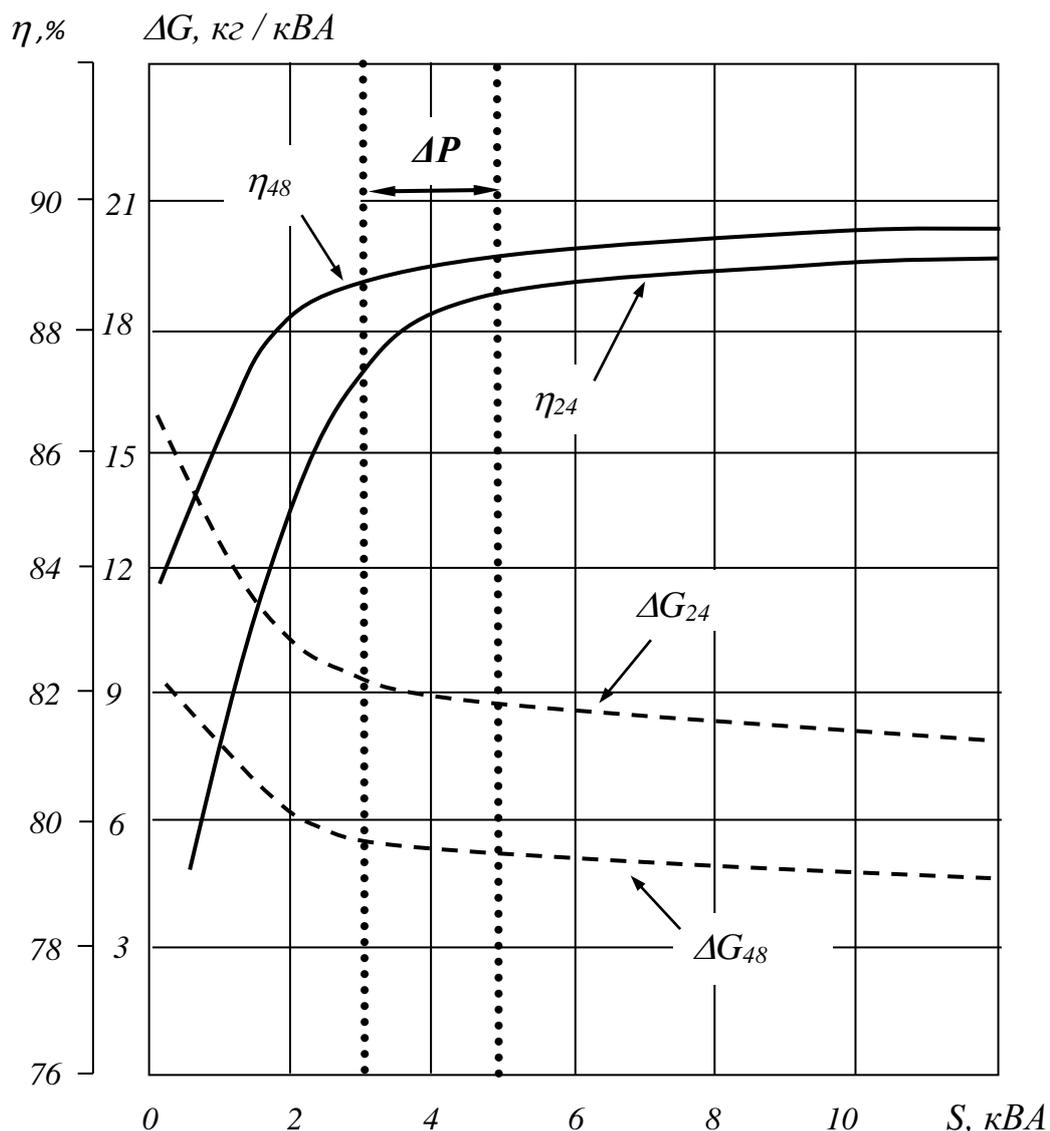


Рисунок 2.8 – Зависимости КПД и удельной массы автономных инверторов от мощности при входном напряжении 24 и 48 В и значении коэффициента трансформации $K_T = 9$ и $K_T = 5$ соответственно

2.2 Функциональные схемы автономных инверторов на трансформаторе с вращающимся магнитным полем

Если применить в составе силовой схемы АИ однофазно-трёхфазный трансформатор с вращающимся магнитным полем (ТВМП), то это позволит вместо трёхфазной электронной схемы преобразования использовать однофазную схему. В результате уменьшится уровень электромагнитных помех,

создаваемых силовыми электронными приборами при коммутации и повысить КПД. Кроме того, упрощаются функции системы управления, в том числе защиты преобразователя, что в комплексе приведет к повышению показателей надежности АИ, прежде всего, увеличению ресурса работы [16, 23, 57, 124].

Аналогами при разработке новых структурных решений АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП, рассматриваемых в диссертационном исследовании, были патенты РФ [103–105].

Конструктивно ТВМП может быть выполнен на базе тороидального трансформатора с сердечником или на базе асинхронного двигателя с фазным ротором. Две первичные обмотки ТВМП, включенные между собой через фазосдвигающий конденсатор C_ϕ (рисунок 2.9) размещаются на сердечнике тороидального трансформатора или на фазном роторе асинхронной машины. При протекании тока по первичным обмоткам формируется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают тороидальный сердечник или статор электрической машины. Поскольку на тороидальном сердечнике или статоре асинхронной машины размещены три обмотки, сдвинутые между собой в пространстве на угол 120° , то на их выводах будет формироваться трехфазная симметричная система напряжений.

Принцип работы АИ на ТВМП. Силовая схема инвертора И преобразует напряжение постоянного тока источника U_H посредством ШИМ в напряжении переменного тока. Выходной пассивный Г-образный LC-фильтр Ф, обеспечивает требуемое качество напряжения синусоидальной формы, которое прикладывается к двум первичным обмоткам трансформатора с вращающимся магнитным полем ТВМП (рисунок 2.9). Магнитная система ТВМП однофазный синусоидальный сигнал посредством двух первичных обмоток и фазосдвигающего конденсатора, преобразует в трёхфазную симметричную систему напряжений, прикладываемую к выходным выводам преобразовате-

ля напряжения постоянного тока в переменный А, В и С (рисунок 2.9) [22, 124].

Система управления СУ автономного инвертора содержит следующие функциональные блоки:

- трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ – источник ведущего сигнала, на выходе которого формируется напряжение постоянного тока пропорциональное выходному напряжению АИ;

- генератор пилообразного напряжения ГПН – источник опорного сигнала, при изменении его частоты изменяется частота тока выходного напряжения преобразователя;

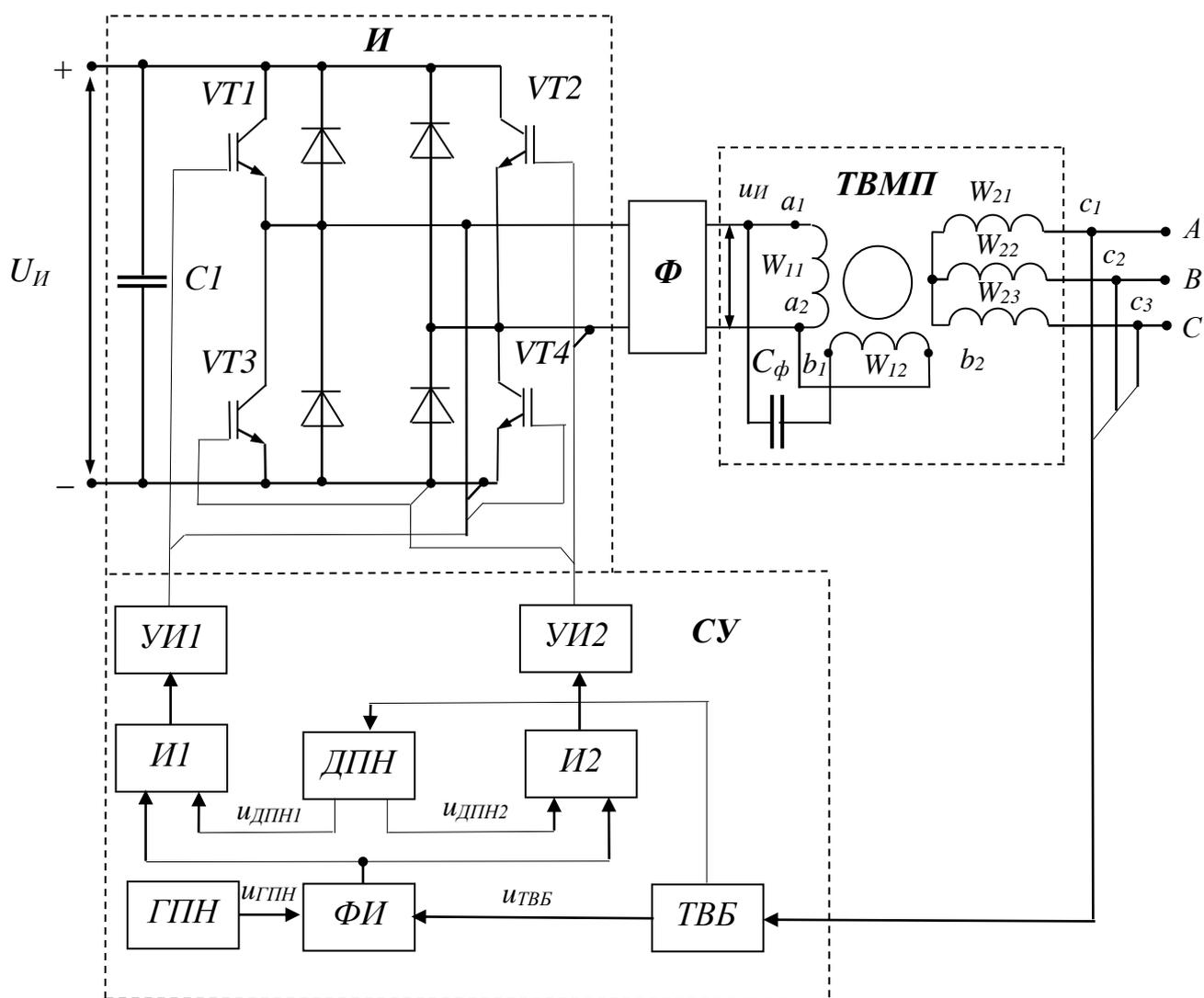


Рисунок 2.9 – Функциональная схема АИ на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем

- формирователь импульсов ФИ;
- датчик полярности напряжения ДПН;
- логические элементы И – И1 и И2;
- усилители импульсов УИ1 и УИ2 выводы которых подключены к соответствующим управляющим электродам силовой схемы инвертора И.

Принцип работы СУ. С выхода генератора ГПН (рисунок 2.9) опорный сигнал пилообразной формы $u_{ГПН}$ (рисунок 2.10, а) прикладывается к первому входу формирователя импульсов ФИ, ко второму входу формирователя импульсов прикладывается напряжение ведущего сигнала постоянного тока $u_{ТВБ}$ с выхода трансформаторного блока ТВБ.

Когда напряжение на выходе генератора пилообразного напряжения больше выходного напряжения трансформаторно-выпрямительного блока, т.е. когда выполняется условие, что $u_{ГПН} > u_{ТВБ}$, тогда на выходе формирователя импульсов ФИ формируются управляющие импульсы (рисунок 2.10, а, б), которые поступают на первые входы логических элементов И1 и И2. На вторые входы этих элементов поступает сигнал от датчика полярности напряжения ДПН $u_{ДПН}$ (рисунок 2.10, в), работа которого синхронизирована с одной из фаз выходного напряжения АИ через трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ (рисунок 2.9).

При положительной полярности выходного напряжения сигнал $U_{ДПН1}$ (рисунок 2.10, в) с выхода датчика полярности напряжения ДПН поступает на второй вход логического элемента И1 с выхода этого элемента через усилитель импульсов УИ1 импульсы управления поступает на управляющие входы транзисторов VT1 и VT4. Они периодически открываются и закрываются посредством ШИМ в результате на выходе силовой схемы инвертора И формируется положительная полуволна напряжения синусоидального тока $u_{И}$ (рисунок 2.10, б, в). В случае, когда полярность выходного напряжения переменного тока, синхронизированного с одной из фаз выходного напряжения АИ будет отрицательной, то это приведёт к закрытию логического эле-

мента И1 и откроется логический элемент И2, поскольку на его второй вход поступает сигнал $U_{ДПН2}$ от датчика полярности напряжения. В результате закроются транзисторы VT1 и VT4 и периодически будут открываться и закрываться транзисторы VT2 и VT3. В результате на выходе силовой схемы инвертора И формируется отрицательная полуволна напряжения синусоидального тока $u_{и}$ (рисунок 2.10, б, в).

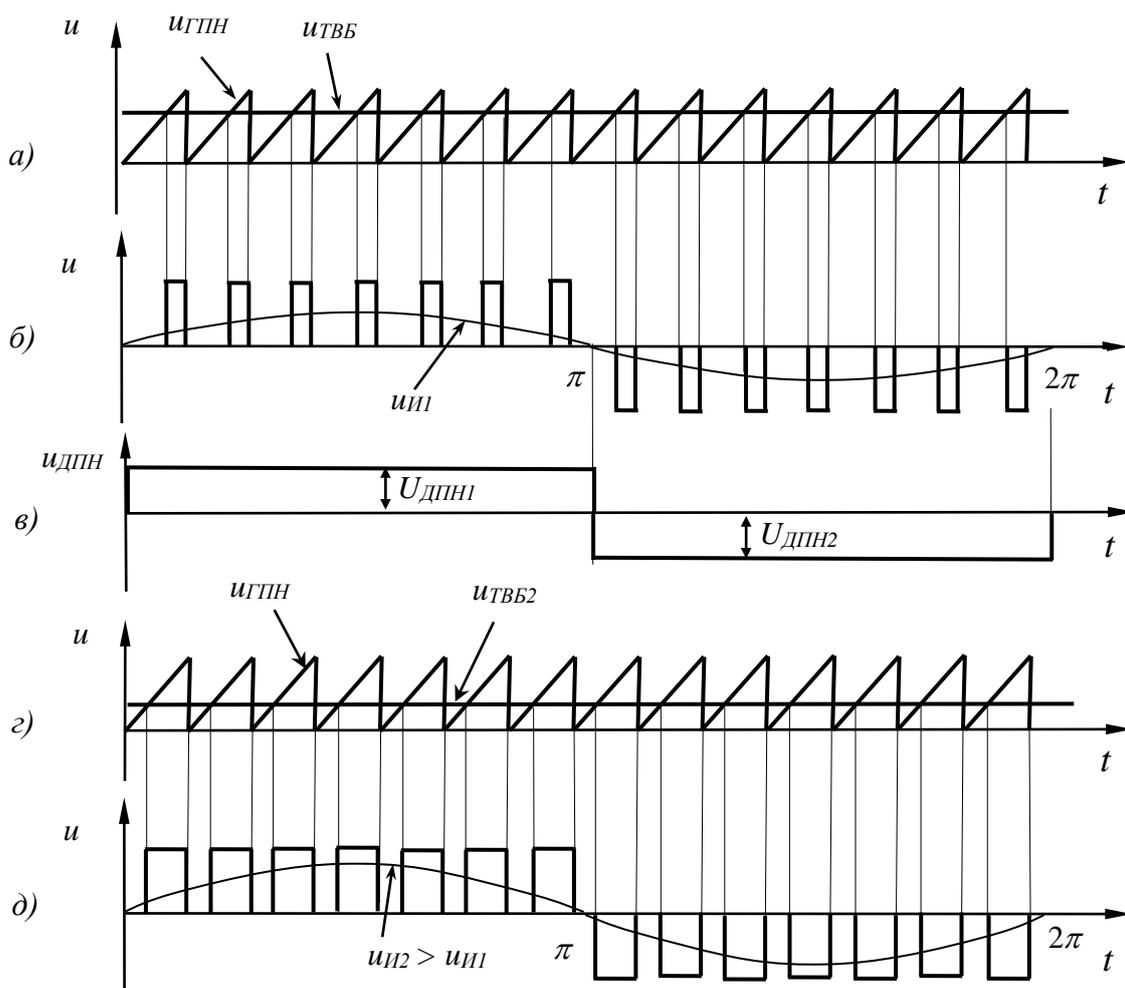


Рисунок 2.10 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип формирования и стабилизации выходного напряжения автономного инвертора

К примеру, если выходное напряжение АИ (выводы А, В и С рисунок 2.9) уменьшится, то и уменьшится напряжение на выходе трансформаторно-выпрямительного блока ТВБ до величины $u_{ТВБ2}$ (рисунок 2.10, г).

Это приведёт к увеличению времени открытого состояние транзисторов VT1, VT4 и VT2 и VT3 (увеличению длительности импульсов и уменьшению длительности паузы) и повышению, соответственно, напряжения на выходе преобразователя до величины $u_{и2}$ (рисунок 2.10, д).

Для улучшения гармонического состава выходного напряжения силовой схемы инвертора И (рисунок 2.9) и, соответственно, улучшения массогабаритных показателей и КПД выходного фильтра Ф, целесообразно в составе системы управления в качестве опорного (эталонного) сигнала применить сигнал треугольной формы [39, 41]. Это позволит изменять длительность импульсов ШИМ на полупериодах формирования выходного напряжения инвертора И (рисунок 2.9). Система управления с реализацией такого принципа управления приведена на рисунке 2.11. Из состава функциональных элементов системы управления, приведенной на рисунке 2.10, исключены трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ и генератор пилообразного напряжения ГПН и введены элементы:

- задающий генератор сигнала синусоидальной формы ЗГ, являющийся источником опорного сигнала;

- измеритель отклонения напряжения ИОН;

- сумматор С;

- выпрямитель В;

- генератор треугольного напряжения ГТН.

Принцип работы системы управления СУ автономного инвертора с опорным сигналом треугольной формы (рисунок 2.11). Задающий генератор ЗГ, вырабатывает опорный сигнал синусоидальной формы $u_{зГ}$, который синхронизирован с частотой тока, которая необходима для потребителей электроэнергии. При этом, частота напряжения $u_{зГ}$ может быть как равной, так и больше или меньше промышленной частоты, в зависимости от того какую функцию выполняет инвертор (стабилизировать напряжение или регулировать частоту для изменения частоты вращения электропривода). Выходное

напряжение от блока ЗГ прикладывается к одному из входов сумматора С, на второй вход которого от измерителя отклонения напряжения ИОН поступает сигнал Δu , если произошло отклонение выходного напряжения от номинального значения. Сигнал рассогласования Δu имеет синусоидальную форму. Результирующий сигнал с выхода сумматора С u_{Σ} поступает на вход выпрямителя В, где преобразуется в напряжение постоянного тока. Далее с выхода выпрямителя В сигнал u_B (рисунок 2.12, а) поступает на первый вход формирователя импульсов ФИ, на второй вход формирователя импульсов поступает сигнал от генератора треугольного напряжения ГТН $u_{ГТН}$ (рисунок 2.12, а).

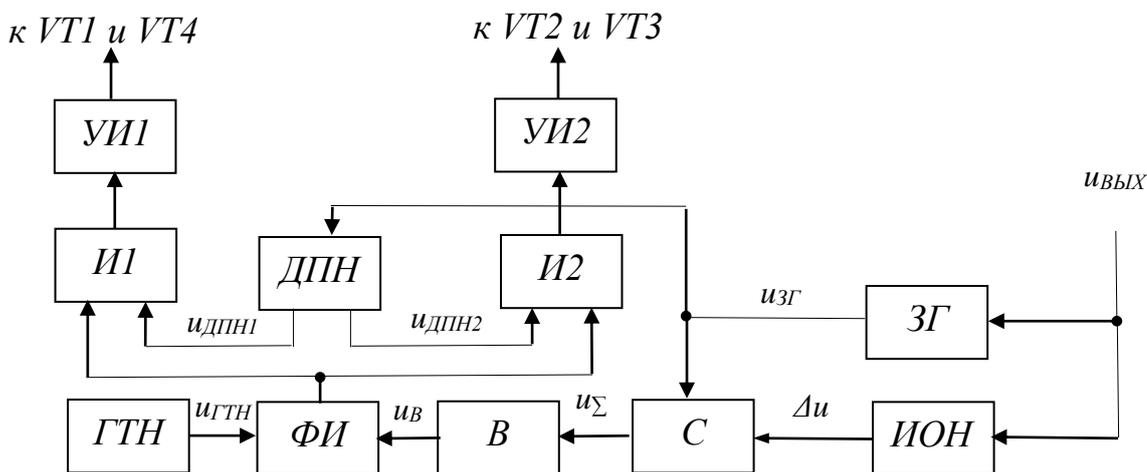


Рисунок 2.11 – Структурная схема системы управления АИ на ТВМП с опорным сигналом треугольной формы

Когда напряжение на выходе генератора треугольного напряжения будет меньше напряжения на выходе выпрямителя, т.е. будет выполняться условие $u_{ГТН} < u_B$ на выходе формирователя импульсов ФИ формируются импульсы управления силовыми транзисторами схемы преобразования И (рисунок 2.12, а, б), которые, как и в предыдущей, рассмотренной схеме управления, поступают на первые входы логических элементов И1 и И2 (рисунок 2.9). На вторые входы логических элементов И1 и И2 поступает сигнал от

датчика полярности напряжения ДПН $u_{ДПН}$ (рисунок 2.12, в). Формирование импульсов управления происходит аналогично схеме управления, приведённой на рисунке 2.9.

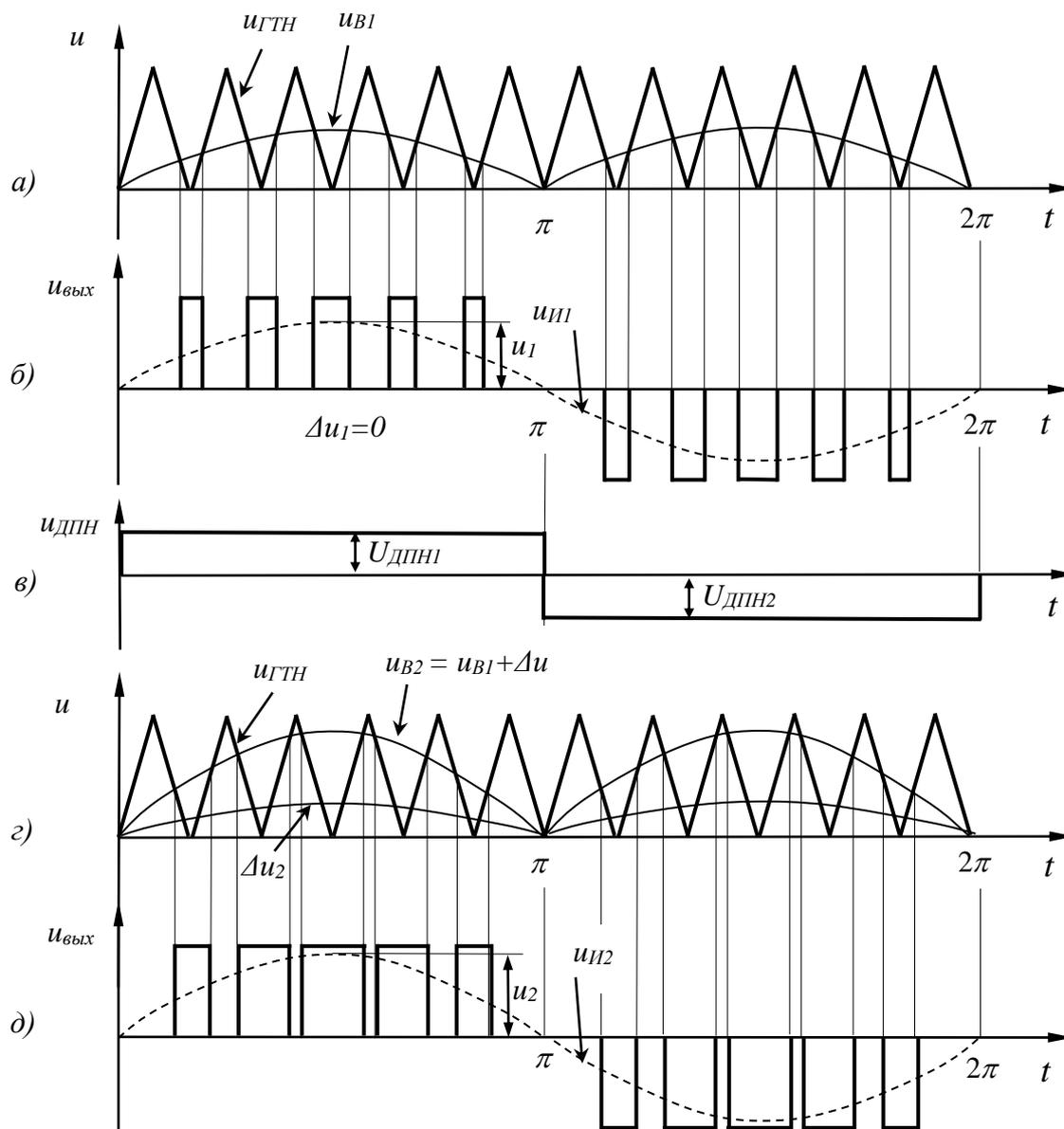


Рисунок 2.12 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип формирования и стабилизации выходного напряжения АИ с опорным сигналом треугольной формы

К примеру, если напряжения на выводах А, В и С автономного инвертора (рисунок 2.9). Тогда увеличится значение сигнала рассогласования Δu до величины Δu_2 (рисунок 2.12, д), а это приведёт к увеличению напряжения

на выходе выпрямителя В до величины $u_{В1}$ (рисунок 2.12, г). В результате увеличивается длительность импульсов управления на выходе формирователей импульсов ФИ и уменьшается длительность паузы между импульсами ШИМ, что приводит к увеличению напряжения на выходе АИ $u_{ВЫХ2}$ (рисунок 2.12, г, д).

Основными недостатками рассмотренных схем АИ, относительно большие массогабаритные показатели ТВМП, включая наличие фазосдвигающего конденсатора большой емкости, а также при несимметричных режимах работы нагрузки искажается форма кругового вращающегося магнитного поля, что уменьшает диапазон изменений напряжений трехфазной системы, позволяющий их стабилизировать системой управления до номинальных значений. Один из способов, позволяющим улучшить характеристики, рассмотренных схем АИ, является регулирование величиной реактивной мощности фазосдвигающего конденсатора, однако это значительно усложняет силовую схему преобразователя и его системы управления и защиты. Улучшить эксплуатационно-технические характеристики АИ на ТВМП можно за счёт исключения из состава схемы АИ фазосдвигающего конденсатора, используя в составе преобразователя два однофазных инвертора каждый из которых подключён к первичной однофазной обмотке ТВМП со средней точкой. Сдвиг фаз между токами первичных обмоток, для создания кругового вращающегося магнитного поля, осуществляется фазосдвигающим устройством.

На рисунке 2.13 приведена функциональная схема АИ, выполненная на двух однофазных инверторах и однофазно-трёхфазном ТВМП (выходные фильтры инверторов на рисунке не показаны), а на рисунке 2.14 приведены диаграммы напряжений, поясняющие принцип его работы.

Принцип работы АИ. Напряжение источника постоянного тока $U_{И}$ прикладывается к входным выводам двух однофазным автономным инверто-

рам АИ1 и АИ2, выполненных на транзисторах VT1, VT2 и VT3, VT4 соответственно (рисунок 2.13).

При переменном включении этих транзисторов в первичных обмотках поочередно W_{11} или W_{12} , а также W_{21} или W_{22} протекают токи, которые имеют разное направление. В результате в первичных обмотках ТВМП протекают переменные токи, вызывающие действие переменных магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 . В магнитопроводе ТВМП эти потоки складываются, создавая суммарный магнитный поток Φ_Σ (рисунок 2.14, *d, e*), который образует круговое вращающееся магнитное поле, вызывающее действие трёхфазной системы ЭДС во вторичных обмотках ТВМП W_A , W_B и W_C (рисунок 2.13).

Алгоритм работы системы управления АИ. В качестве опорного сигнала системы управления СУ применяется сигнал треугольной формы $u_{ГТН}$, вырабатываемый генератором треугольного напряжения ГТН.

Ведущий сигнал u_B , пропорциональный величине выходного напряжения АИ, вырабатывается трансформаторно-выпрямительным блоком ТВБ (рисунок 2.13). Эти сигналы поступают на формирователь импульсов ФИ1 через фазосдвигающее устройство ФЗУ и формирователь импульсов ФИ2 (рисунок 2.13). Когда $u_{ГТН} < u_B$ на выходах формирователей импульсов формируются сигналы управления $u_{ФИ1}$ и $u_{ФИ2}$ (рисунок 2.14, *a – z*). При этом управляющие импульсы $u_{ФИ1}$ сдвинуты относительно управляющих импульсов $u_{ФИ2}$ на угол φ_1 (рисунок 2.14, *z*).

От формирователя ФИ2 импульс поступают на управляющие электроды транзисторов VT3 и VT4 соответственно через датчик полярности напряжения ДПН2, логические элементы И3 и И4, усилители импульсов УИ3 и УИ4.

Работа датчиков полярности напряжения ДПН1 и ДПН2 (рисунок 2.13) синхронизирована с выходными сигналами фазосдвигающего устройства ФЗУ и трансформаторно-выпрямительным блоком ТВБ, таким образом, что транзисторы VT1 инвертора АИ1 и VT2 инвертора АИ2, включаются при

формировании положительной полуволны выходного напряжения, а транзисторы VT3 инвертора АИ1 и VT4 инвертора АИ2, включаются при формировании отрицательной полуволны выходного напряжения (рисунок 2.14, б, г).

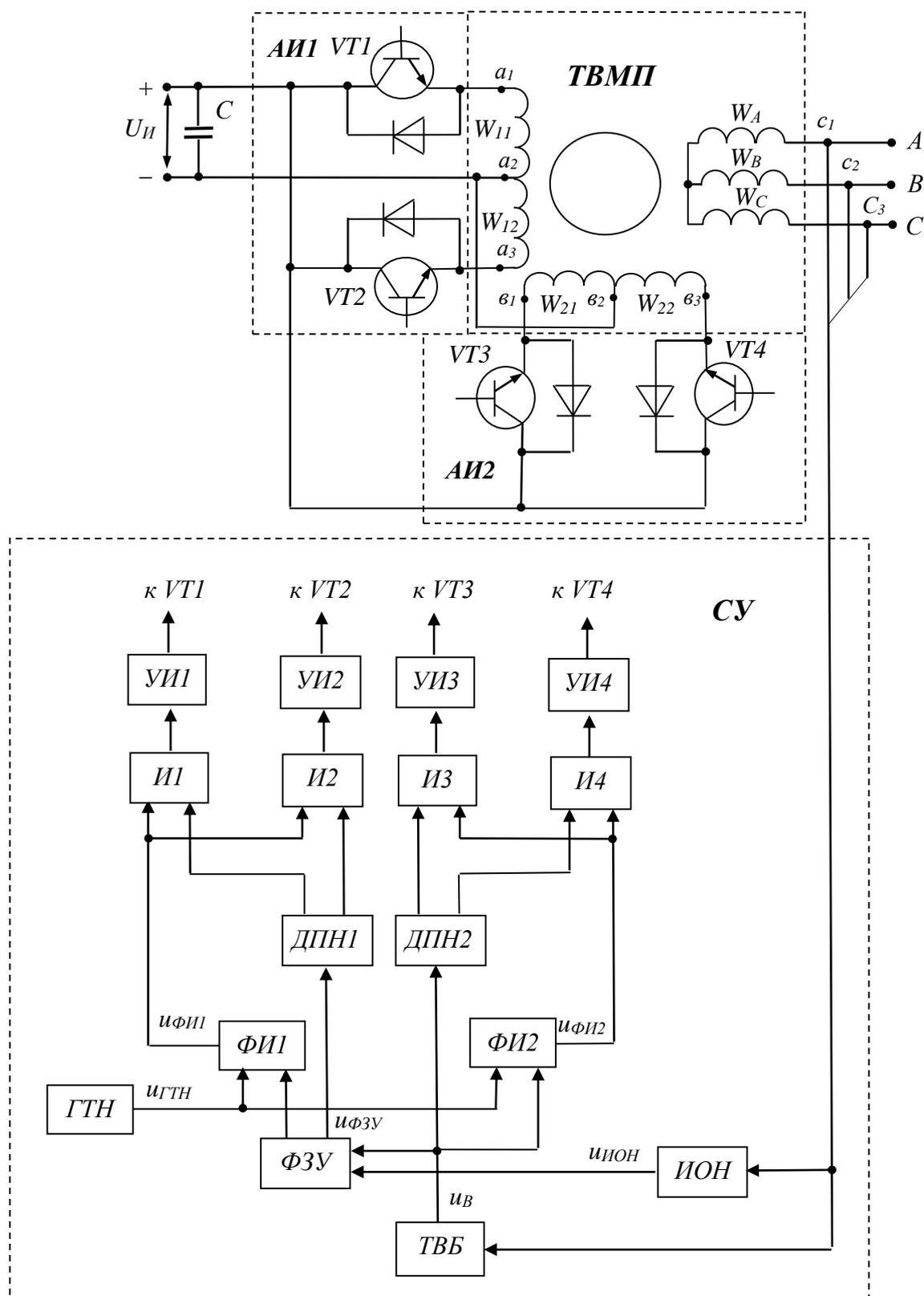


Рисунок 2.13 – Функциональная схема АИ на двух однофазных инверторах и ТВМП

Далее импульсы от формирователя ФИ1 поступают на управляющие электроды транзисторов VT1 и VT2 через датчик полярности напряжения ДПН1, логические элементы И1 и И2, усилители импульсов УИ1 и УИ2.

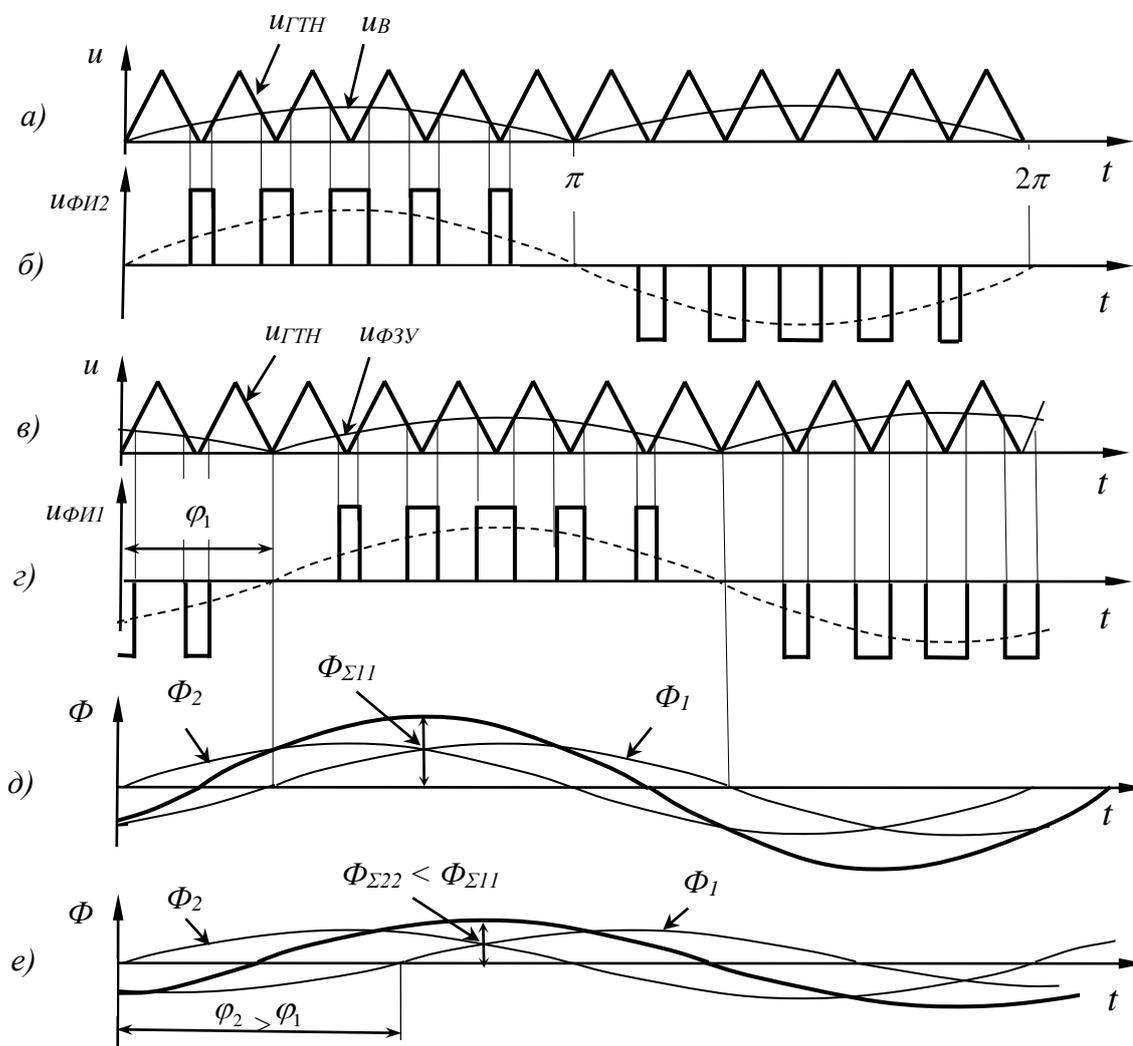


Рисунок 2.14 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы функциональной схемы АИ, приведённой на рисунке 2.9

Принцип стабилизации напряжения АИ. Изменения напряжения от номинальных значений фиксируется измерителем отклонения напряжения ИОН (рисунок 2.13). К примеру, если напряжение на выводах А, В и С преобразователя увеличилось, сигнал рассогласования $u_{ИОН}$ от блока ИОН поступает в фазосдвигающее устройство ФЗУ, который увеличивает угол сдвига фаз между токами, и соответственно магнитными потоками от φ_1 до φ_2 , создава-

емых первичными обмотками инверторов АИ1 и АИ2. В этом случае величина суммарного магнитного потока уменьшится, т.е. $\Phi_{\Sigma 22} < \Phi_{\Sigma 11}$ (рисунок 2.14, *д, е*). В результате напряжение на выводах преобразователя А, В и С уменьшится до номинальных значений.

Важной особенностью рассмотренных функциональных схем автономных солнечных инверторов на ТВМП, является то, что они могут быть источником напряжения переменного тока не только 50 Гц, а также 200 и 400 Гц. Для этого изменяется (вручную или автоматически) частота опорного сигнала генератора пилообразного напряжения ГПН (рисунок 2.9), задающего генератора синусоидального напряжения ЗГ (рисунок 2.11) и генератора треугольного напряжения ГТН (рисунок 2.13). Необходимо учитывать только то, что при увеличении частоты тока на 200 и 400 Гц уменьшится общая мощность автономного источника электроэнергии – СФЭУ, на 20-25 и 35-40 % соответственно.

Кроме того, рассмотренные системы управления АИ могут генерировать напряжение с частотой тока ниже промышленной с целью регулирования частоты вращения электропривода. Это осуществляется при небольшой доработке системы управления, включив в её структуру элемент обратной связи, контролирующей частоту вращения электропривода. Применение АИ для регулирования частоты вращения электроприводом приведёт не значительному ухудшению эксплуатационно-технических характеристик преобразователя в сравнении если бы он генерировал ток повышенной частоты.

2.3 Принципиальная электрическая схема автономного инвертора и алгоритм работы системы управления

Источником электроэнергии автономного инвертора напряжения является солнечная панель (батарея) с номинальным напряжением постоянного тока 48 В. В качестве резервного источника электроэнергии применяется ак-

кумуляторная батарея. Солнечная панель и аккумуляторная панель подключаются к инвертору через контроллер заряда, позволяющий распределять их ресурс в зависимости от текущего режима работы (рисунок 2.15).

Принцип работы. Постоянное напряжение от солнечных панелей прикладывается к конденсатору С6, который выполняет две функции: входного фильтра, обеспечивающего требуемое качество напряжения постоянного тока и сглаживание пульсаций напряжения во время коммутации полевых транзисторов силовой электронной схемы инвертора. Напряжение постоянного тока преобразуется в напряжение переменного тока двумя независимыми инверторами, выполненными по мостовой схеме на полевых транзисторах VT2, VT3, VT6, VT7 и VT4, VT5, VT8, VT9 соответственно (рисунок 2.15).

С выхода инверторов напряжение прикладывается к первичным обмоткам ТВМП W11 и W12 через фильтры Ф1 и Ф2. С выходных обмоток ТВМП W21, W22 и W23 трехфазная симметричная система напряжений прикладывается к шинам А, В и С, к которым подключаются потребители переменного тока (рисунок 2.15).

Центральным управляющим элементом принципиальной электрической схемы управления является 8-разрядный микроконтроллер DD1 типа PIC16F1827 (рисунок 2.15). Микроконтроллер осуществляет управление полевыми силовыми транзисторами VT2-VT9 двух инверторов посредством высокочастотных ШИМ-сигналов.

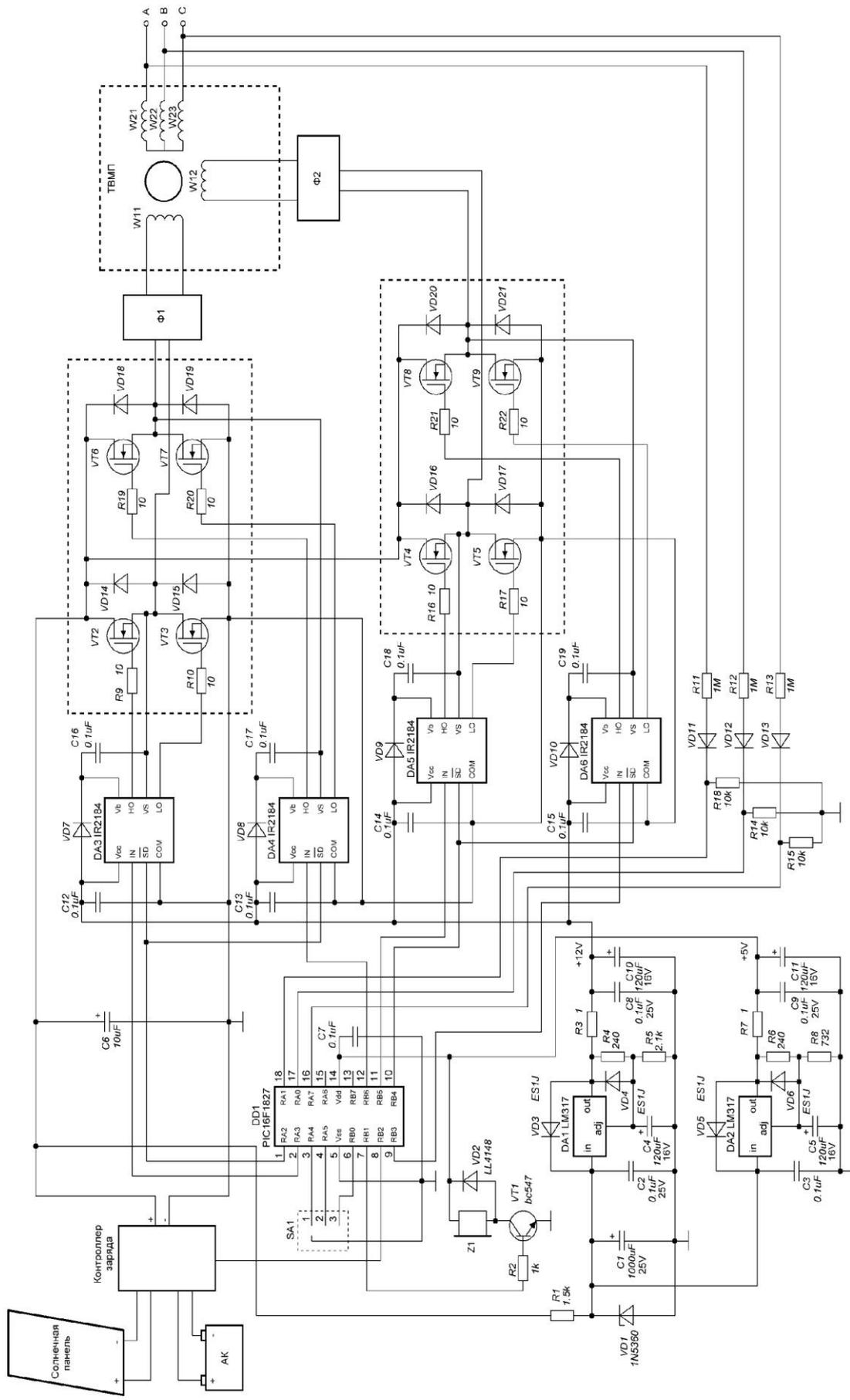


Рисунок 2.15 – Функциональная электрическая схема солнечной фотоэнергетической установки

Управляющие выходы микроконтроллера подключены к силовым транзисторам через специализированные микросхемы-драйверы DA3-DA6, что обеспечивает высокие регулировочные характеристики и соответственно качество управления.

Диоды VD14-VD21 служат для ограничения скачков ЭДС трансформатора с вращающимся магнитным полем и защищают соответственно силовые транзисторы от пробоя.

Для повышения эффективности работы автономных инверторов с различными видами нагрузок в схеме предусмотрен переключатель режимов работы SA1. К примеру, если в случае питания трёхфазной нагрузки (асинхронных электродвигателей с постоянным моментом нагрузки $M_c = const$) напряжение на выходе может регулироваться пропорционально частоте (режим 1):

$$\frac{U}{f} = const. \quad (2.36)$$

При питании электропривода вентиляторов на выходе инвертора может регулироваться пропорционально квадрату частоты (режим 2):

$$\frac{U}{f^2} = const. \quad (2.37)$$

В случае, когда момент нагрузки обратно пропорционален скорости, напряжение на выходе инвертора может регулироваться пропорционально корню квадратному из частоты (режим 3):

$$\frac{U}{\sqrt{f}} = const. \quad (2.38)$$

При каждом переключении режима работы схемы меняется алгоритм работы управляющего контроллера, и, соответственно, выходные сигналы ШИМ драйверами DA3-DA6 (рисунок 2.15).

Обратная связь в принципиальной электрической схеме (рисунок 2.15) реализована с выхода ТВМП и посредством делителей напряжения на рези-

сторях R11-R13, R15, R14 и R18, сигнал подается на аналого-цифровые входы микроконтроллера DD1. При этом микроконтроллер постоянно контролирует величину выходного напряжения инвертора и изменяет скважность управляющих импульсов ШИМ таким образом, чтобы колебания напряжения не выходили за установленные пределы. В случае, когда напряжение на выходе инвертора оказывается недостаточным ввиду ограниченной мощности, выдаваемой солнечной батареей (пасмурный день или ночь), контроллер имеет дополнительный вывод управления (8), позволяющий перевести контроллер заряда в форсированный режим и перевести питание нагрузки через инвертор от аккумуляторных батарей.

В схеме (рисунок 2.15) применяются два маломощных стабилизатора напряжения, один для микроконтроллера DD1, второй – для управляющих драйверов DA3-DA6. Стабилизатор напряжения контроллера выполнен на основе регулируемой интегральной схемы DA2 типа LM317 с выходным напряжением 5 В. Стабилизатор напряжения драйверов выходных транзисторов выполнен на основе интегральной схемы DA1 с выходным напряжением 12 В. Ток, потребляемый данной частью схемы, не превышает 0,1 А. Входное напряжение двух стабилизаторов прикладывается от первичного параметрического стабилизатора, выполненного на базе балластного резистора R1 и стабилитрона VD1. Данная цепочка обеспечивает понижение напряжения до 25 В от первичного источника питания схемы и подключена к выходу контроллера заряда. Ввиду малого тока, потребляемой схемой, рассеиваемая мощность на резисторе R1 мала и практически не влияет на общий высокий КПД инвертора напряжения.

В схеме автономного инвертора напряжения предусмотрена звуковая сигнализация, выполненная на основе звукового излучателя Z1, которая срабатывает при возникновении аварийного режима работы статического преобразователя напряжения или сигнализации при переключении различных режимов работы инвертора.

Поскольку силовые электронные транзисторы VT2-VT9 работают в ключевом режиме и имеют очень малое сопротивление в открытом состоянии, потери на них небольшие, поэтому инвертор имеет высокий КПД в любых режимах эксплуатации. Применение микроконтроллера при этом позволяет гибко управлять характеристиками инвертора, а также иметь высокие эксплуатационные характеристики. Для разработки программы работы микропроцессора, осуществляющего управление работой силовых электронных приборов солнечного инвертора, разработан алгоритм, приведенный на рисунке 3.13.

На рисунке 2.16 обозначения функциональных элементов и их выходных параметров, раскрываются при пояснении принципа работы системы управления, приведенной на рисунке 2.9. Применяемые в алгоритме обозначения t_1 и t_2 – время открытого состояния полевых транзисторов VT1, VT2 и VT3, VT4 соответственно, ДН1 и ДН2 – датчики напряжения, фиксирующие превышение нормы отклонения напряжения. После срабатывания датчиков ДН1 или ДН2 прекращается подача импульсов управления на силовые электронные приборы инвертора – транзисторы VT1–VT4.

Для изменения величины частоты тока на выходе АИ необходимо изменить частоту напряжения задающего генератора $u_{зг}$ (рисунок 2.16). При этом, расчёты показали, что при увеличении частоты до уровня 200 Гц, КПД автономного инвертора уменьшится на 5–8 % [40, 41].

2.4 Выводы

На этапе проектирования или выбора АИ предложено оценивать их эффективность по следующим критериям:

– КПД, определяемый по результатам расчёта статических динамических потерь в силовых электронных приборах и потерь в системе управления;

– показатели качества напряжения, оценивающиеся по величине коэффициента гармоник;

– показатели активной, реактивной и полной мощности.

Расчёты показали, что энергетические показатели АИ (активной, реактивной полной мощности и КПД) в основном зависят от количества и скважности импульсов ШИМ, которые оказывают влияние на значение коэффициента гармоник K_G . Определено, что скважность импульсов λ для обеспечения небольших значений амплитуды высших гармоник должна изменяться в пределах от 0,8 до 1, при этом выходной фильтр необходимо настраивать для подавления (в резонанс) с 9-й гармоникой. Для расширения диапазона регулирования напряжения при значениях скважности импульсов λ от 0,6 до 1 выходной фильтр должен быть настроен для подавления 5-й гармоники. При этом максимальным КПД автономного инвертора будет, если количество модулирующих импульсов i находится в пределах от 5 до 9.

Получены зависимости КПД и удельной массы АИ на ТВМП при мощностях 3 и 5 кВт при входных напряжениях источника напряжения постоянного тока 24 и 48 В. Показано, что КПД АИ при напряжении 48 В при мощностях преобразователя меньше 3 кВт больше 4–6 %, в сравнении с АИ с входным напряжением 24 В. При мощности от 3 кВт и больше КПД не отличается больше чем на 2 %. Удельная масса АИ при напряжении источника 48 В на 2–3 кг/кВА меньше.

Разработана функциональная схема АИ, выполненная на однофазной мостовой схеме и однофазно-трёхфазном ТВМП. Преобразование напряжение постоянного тока и стабилизация напряжения переменного тока осуществляются с использованием в качестве опорного сигнала системы управления сигнала пилообразной схемы. Для улучшения качества выходного напряжения инвертора и улучшения массогабаритных показателей и КПД выходного фильтра разработана структурная схема системы управления, где в качестве опорного сигнала применяется сигнал треугольной формы.

Основными недостатками рассмотренных схем АИ является наличие фазосдвигающего конденсатора большой емкости, включенного между первичными обмотками ТВМП. При этом для стабилизации выходного трёхфазного напряжения АИ необходимо изменять ёмкость фазосдвигающего конденсатора, потому что при несимметричных режимах работы нагрузки искажается форма кругового вращающегося магнитного поля, что дополнительно вносит искажения в форму напряжения.

Разработана функциональная схема АИ на ТВМП, где силовая электронная схема преобразования выполнена на двух однофазных инверторах, содержащих по два полупроводниковых прибора, сдвиг напряжений на выходе которых, для получения вращающегося магнитного поля, осуществляется фазосдвигающим устройством системы управления.

Разработана функциональная схема СФЭУ на ТВМП, силовая схема АИ выполнена на полевых транзисторах, а принципиальная электрическая схема системы управления преобразователя, выполненная с использованием микропроцессорной техники, обеспечивает стабилизацию напряжения во всех режимах функционирования автономного источника электроэнергии. Для разработки программы работы микропроцессора системы управления СФЭУ разработан алгоритм по преобразованию и стабилизации напряжения.

При одинаковой мощности эксплуатируемых традиционных трёхфазных автономных инверторов, предлагаемое новое структурно-схемное решение инвертора на однофазной схеме преобразования, содержащего однофазно-трёхфазный трансформатор с вращающимся магнитным полем, имеет КПД на 5–7 % больше, при этом ресурс работы повышается в 1,7–2 раза.

Разработана принципиальная электрическая схема автономного инвертора, выполненная на базе полевых транзисторов и однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем, с использованием микропроцессорной техники и алгоритм работы системы управления по преобразованию и стабилизации напряжения.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НА ТРАНСФОРМАТОРЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

3.1 Особенности математического моделирования инверторов и трансформаторов автономных систем электроснабжения

Известно, что исследования электромагнитных процессов, протекающих в системах электроснабжения на физических моделях связано с большими затратами и трудоемкостью проведения экспериментальных исследований. Однако, разработанный на сегодня математический аппарат, в том числе программное обеспечение, позволяют с высокой эффективностью проводить исследования отдельных функциональных элементов, в том числе автономных инверторов СФЭУ. Силовые схемы статических преобразователей электроэнергии в электротехнике представляются электрическими схемами замещения. Важными факторами, определяющими точность математического моделирования, являются принятые допущения при составлении схемы замещения [39, 59].

Основным допущением при математическом моделировании физических процессов, протекающих в силовых схемах замещения статических преобразователей электроэнергии, принимается линейный характер вольт-амперных характеристик электронных приборов и реактивных элементов. Замена нелинейной вольт-амперной характеристики на линейную основывается на том, что силовой электронный прибор находится либо в закрытом состоянии, либо в открытом. При этом, как правило, что касается транзисторов, на нелинейном участке прибор находится в течение короткого времени. Поэтому, в целом, это не оказывает влияние на точность расчетов, определяемых точностью воспроизведения основных характеристик транзисторов силовой схемы автономного инвертора [36, 123].

Кроме того, при математическом моделировании силовых электронных приборов, принимают допущение, что коммутация приборов происходит мгновенно, ток, протекающий через полупроводниковый прибор и напряжение на приборе изменяются скачком.

В общем случае силовой электронный прибор в электрической схеме замещения заменяется на резистор, который имеет два сопротивления, соответствующие закрытому или открытому состоянию прибора. Когда прибор закрыт, принимают сопротивление резистора равным 10^5-10^6 Ом , а когда открыт – $0,01 \text{ Ом}$.

Для упрощения описания электромагнитных процессов в трансформаторе реальный трансформатор, заменяют трансформатором, у которого число витков первичной обмотки равно числу витков вторичной обмотки. Для этого проводится пересчет параметров вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, в схеме замещения инвертора вместо реального повышающего трансформатора получают эквивалентный трансформатор с коэффициентом трансформации равным единицы. Причем все величины приведенной вторичной обмотки выражаются таким образом, чтобы электромагнитные процессы в трансформаторе не изменялись, т. е. мощность каждой обмотки и фазовые сдвиги между токами и напряжениями во вторичной обмотке приведенного трансформатора остаются такими же, как и в реальном трансформаторе.

При оценке точности (адекватности) результатов математического моделирования целесообразно рассмотреть понятия точности вообще, приближенного значения величин и погрешности [36].

Понятие точность означает, прежде всего, близость двух значений одной и той же величины (B) – теоретического и практического. Первое из этих двух значений называется точным (B_T), второе – приближенным (B_{II}). Значение B_T является реальным значением, а значение B_{II} – как его модель. Чем меньше отличается приближенное значение u_{II} от u_T , тем

оно точнее, т. е. тем меньше погрешность расчётов. В зависимости от того в каких единицах выражается погрешность, она называется абсолютной или относительной.

Разность между B_{II} и B_T , выраженная в единицах измерения величины – это абсолютная погрешность

$$\Delta B = B_{II} - B_T. \quad (3.1)$$

Разность между B_{II} и B_T , выраженная через значения B_{II} или B_T принятые за единицу измерения – это относительная погрешность

$$\delta B = \Delta B / B_T \cong \Delta B / B_{II}. \quad (3.2)$$

Относительная погрешность может выражаться также в процентах

$$\delta B = (\Delta B / B_T) \cdot 100 \cong (\Delta B / B_{II}) \cdot 100. \quad (3.3)$$

Погрешность математического моделирования вызывают два фактора: неточностью численных значений параметров схемы замещения и неточностью математического описания схемы замещения. Поэтому точность расчетного моделирования связана с понятием аппроксимации. Как известно, что аппроксимация – это замена значений различных параметров электрической схемы замещения и математических выражений приближенными, обычно более простыми.

В случае приближенного выражения некоторой функции $f(x)$ функцией $f_a(x) \cong f(x)$ первая из них называется приближенной, вторая – приближающей. Точность приближения характеризует погрешность аппроксимации

$$\Delta f_a = f_a(x) - f(x) = \Delta f_a(x). \quad (3.4)$$

Аппроксимация уравнения

$$F(y, x_i, t_j, D_j) = 0 \quad (3.5)$$

Уравнением

$$F_a(y_a, x_i, t_j, D_j) = 0 \quad (3.6)$$

означает аппроксимацию функции F и y функциями F_a и y_a . В этом случае точность аппроксимации характеризуется погрешностью

$$\Delta y_a = y_a(x_i, t_j) - y(x_i, t_j) = \Delta y_a(x_i, t_j). \quad (3.7)$$

Важно при математическом моделировании электротехнических устройств учитывать погрешность первичной аппроксимации для реактивных элементов:

– для индуктивных элементов

$$u_L(t) = L di_L(t) / dt \quad \text{или} \quad i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt; \quad (3.8)$$

– для емкостных элементов

$$i_C(t) = C du_C(t) / dt \quad \text{или} \quad u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_C(t) dt. \quad (3.9)$$

При этом, источник напряжения для однофазных цепей переменного тока, которым является инвертор для трансформатора, описывается простым уравнением

$$u(t) = U_m \sin(\omega t). \quad (3.10)$$

3.2 Разработка электрической схемы замещения и блок-схемы компьютерной модели

Моделирование режимов работы автономного инвертора на ТВМП проводится для функциональной схемы, приведенной на рисунке 3.6.

На рисунке 3.1 приведена принципиальная электрическая схема замещения автономного инвертора, его входного и выходного фильтра, с подключенным источником электроэнергии постоянного тока U_H , и схема замещения первичной обмотки ТВМП, а на рисунке 3.2 – принципиальная электрическая схема замещения вторичной обмотки ТВМП и трёхфазной нагрузки.

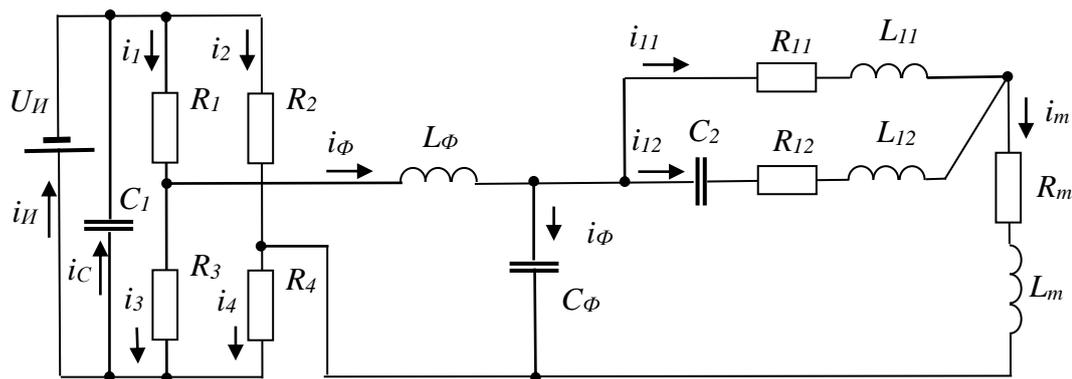


Рисунок 3.1 – Принципиальная электрическая схема замещения инвертора и первичной обмотки ТВМП:

U_{II} – источник напряжения постоянного тока; C_1 – конденсатор входного фильтра инвертора; R_1, R_2, R_3 и R_4 – сопротивления эмиттерно-коллекторного перехода транзисторов инвертора; L_{Φ} и C_{Φ} – индуктивность и емкость выходного фильтра; R_{11}, R_{12} и L_{11}, L_{12} – активные сопротивления и индуктивности первичных обмоток ТВМП; C_2 – фазосдвигающий конденсатор трансформатора; R_m и L_m – сопротивление и индуктивность намагничивающего контура

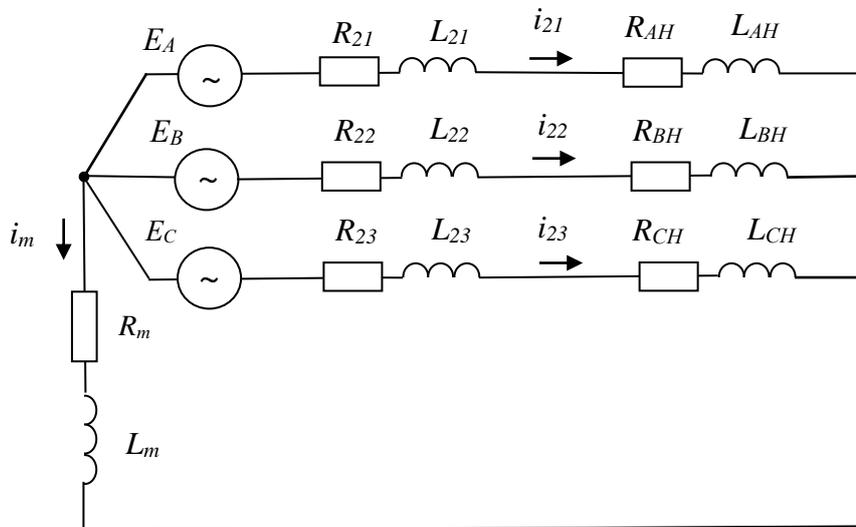


Рисунок 3.2 – Принципиальная электрическая схема замещения вторичной обмотки ТВМП и трёхфазной нагрузки:

E_A, E_B и E_C – источники ЭДС трёхфазной системы напряжений; R_{21}, R_{22}, R_{23} и L_{21}, L_{22}, L_{23} – активные сопротивления и индуктивности вторичных обмоток ТВМП; R_{AH}, R_{BH}, R_{CH} и L_{AH}, L_{BH}, L_{CH} – активные сопротивления и индуктивности нагрузки

На рисунке 3.3 приведена блок-схема компьютерной модели принципиальной электрической схемы замещения инвертора и первичной обмотки

ТВМП, приведенной на рисунке 3.1, а на рисунке 3.4 – блок-схема компьютерной модели принципиальной электрической схемы замещения вторичной обмотки ТВМП и трёхфазной нагрузки. Блок-схемы разработаны с использованием языка программирования MATLAB (версия R2018) и приложения Simulink.

Основной задачей компьютерного моделирования является получение динамических характеристик амплитудных значений токов и напряжений на элементах схемы замещения, а также определение времени переходных процессов во время коммутации силовых электронных приборов АИ в нормальных режимах, в режимах стабилизации напряжения и в аварийных режимах.

Для исследования режимов работы АИ на ТВМП необходимо определить параметры схем замещения.

3.3 Расчет параметров электрической схемы замещения

В основу расчёта методики расчёта параметров электрических схем замещения АИ и ТВМП (рисунок 3.1 и рисунок 3.2), использовались методики расчёта электрических параметров мостовых схем автономных инверторов, расчёт параметров схем замещения трансформаторов и асинхронных двигателей с фазным ротором [30, 33, 56].

Напряжение источника питания U_H выбираем равным 24 В, что соответствует номинальному напряжению солнечных батарей. Фазное напряжение нагрузки $U_\phi = 220$ В, номинальная мощность нагрузки $S_H = 5$ кВт, коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_H = 0,8$.

Сопrotивление резисторов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 имеют два значения: для открытого состояния $0,1$ Ом, а для закрытого – 10^5 Ом;

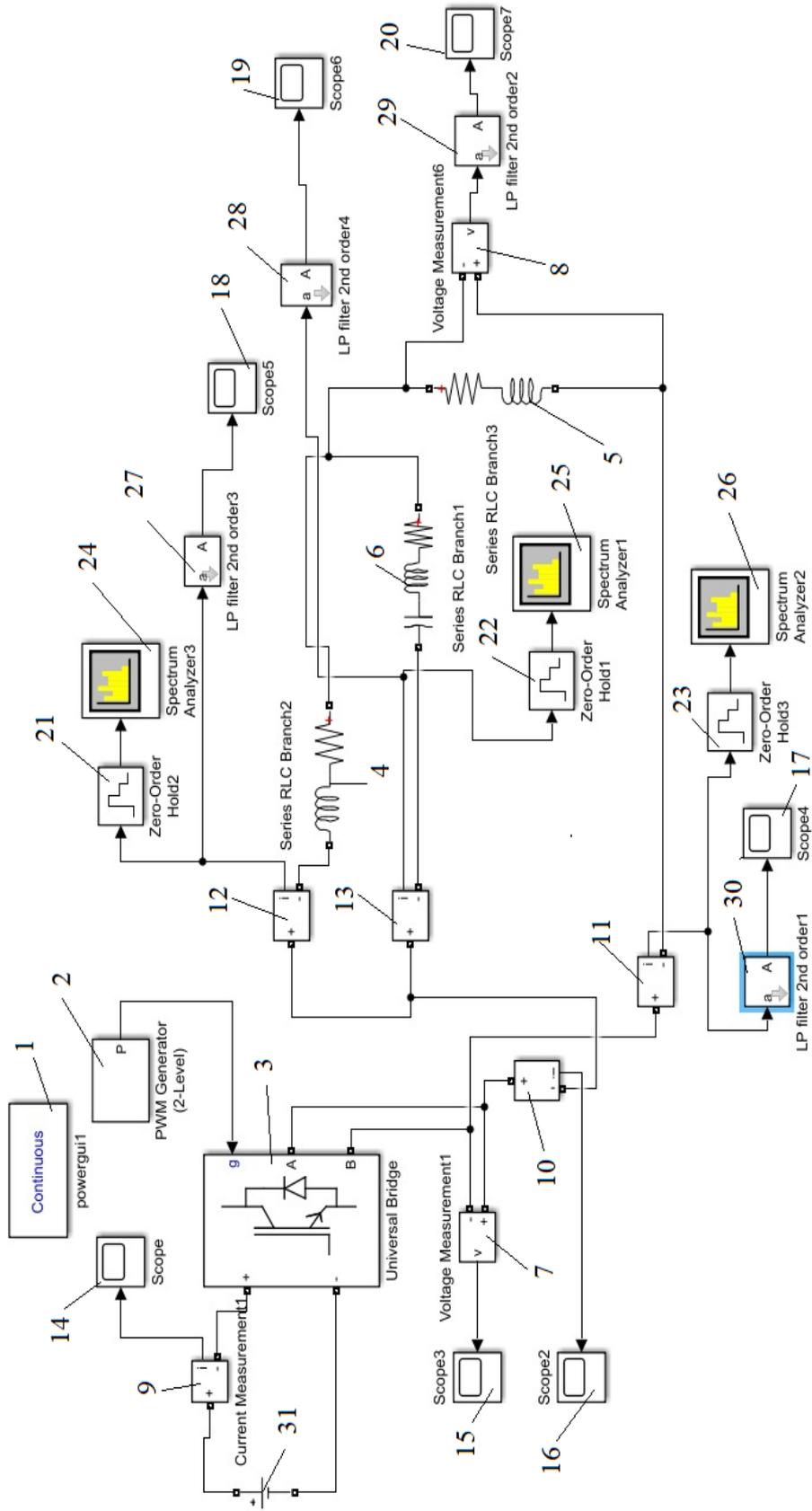


Рисунок 3.3 – Блок-схема компьютерной модели инвертора (рисунок 3.1):

1 –графический интерфейс пользователя; 2 – 2-х уровневый ШИМ генератор; 3 – универсальный мост; 4, 5 – RL–цель; 6 – RLC– цель; 7, 8 – датчики напряжения; 9–13 – датчики тока; 14–20 – осциллограф; 21–23 – блок экстраполятора нулевого порядка; 24–26 – анализатор спектра; 27–30 – фильтр низких частот; 31 – источник постоянной ЭДС

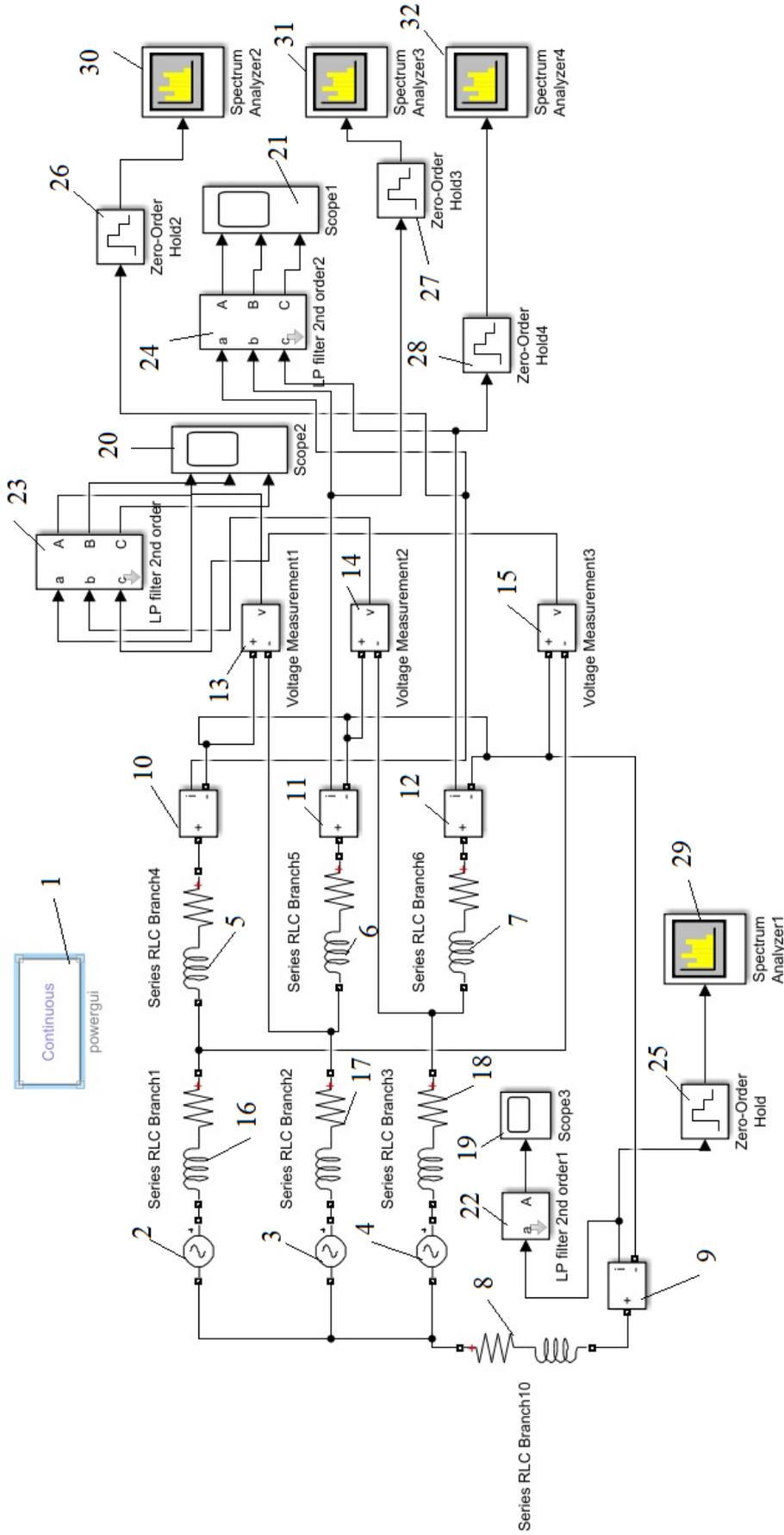


Рисунок 3.4 – Блок-схема компьютерной модели ТВМП (рисунок 3.2):

1 – графический интерфейс пользователя; 2–4 – трехфазная система напряжений; 5–8, 16–18 – RL – цепь; 9–12 – датчики тока; 13–15 – датчики напряжения; 19–21 – осциллограф; 22–24 – фильтр низких частот; 25–28 – блок экстраполиатора нулевого порядка; 29–32 – анализатор спектра

Параметры активных сопротивлений первичных и вторичных обмоток схемы замещения однофазно-трехфазного ТВМП R_{11} , R_{12} и R_{21} , R_{22} , R_{23} , а также емкость фазосдвигающего конденсатора C_2 , определяются по формулам, рассмотренным в [33, 37, 111].

С учетом, что полная мощность вторичных обмоток ТВМП S_2 равна номинальной мощности нагрузки S_H , то полная мощность первичных обмоток

$$S_1 = S_2 / \eta_T, \quad (3.11)$$

где η_T – КПД трансформатора, которое определяется на основании опыта эксплуатации асинхронных электрических машин с фазным ротором, но при отсутствии воздушного зазора [23, 51].

Активная мощность первичных обмоток

$$P_1 = S_1 \cos \varphi_H. \quad (3.12)$$

Индуктивные сопротивления рассеяния первичных обмоток ТВМП определяются с учётом по формуле

$$x_{11} = x_{12} \approx 0,05 \frac{U_H}{S_1}. \quad (3.13)$$

Индуктивность первичных обмоток

$$L_{11} = L_{12} = x_{11} / 2\pi f. \quad (3.14)$$

Ток холостого хода трансформатора

$$I_O = (0,1 \div 0,02) I_{11}, \quad (3.15)$$

Коэффициент мощности трансформатора на холостом ходу изменяется в пределах $\cos \varphi_O = 0,08 \div 0,09$. Потери в ТВМП на холостом ходу

$$P_O = U_1 I_O \cos \varphi_O. \quad (3.16)$$

Полное сопротивление ветви намагничивания

$$Z_m \approx U_H / I_O. \quad (3.17)$$

Активное сопротивление ветви намагничивания

$$R_m = P_o / I_o^2 = Z_m \cos \varphi_o. \quad (3.18)$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (3.19)$$

Индуктивность ветви намагничивания

$$L_m = x_m / 2\pi f. \quad (3.20)$$

Ток во вторичной обмотке трансформатора

$$I_{21} = I_{11} / k, \quad (3.21)$$

где k – коэффициент трансформации.

Как известно при расчётах параметров схемы замещения параметры схемы замещения вторичной обмотки трансформатора приводятся по напряжению к параметрам первичной обмотки.

Приведенные значения тока и напряжения во вторичных обмотках

$$I'_2 = I_2 / k, \quad U'_2 = kU_2. \quad (3.22)$$

Приведенные значения активного и индуктивного сопротивления вторичных обмоток ТВМП

$$R'_{21} \approx R_{11}, \quad x'_{21} \approx x_{11}. \quad (3.23)$$

Тогда, активное и индуктивное сопротивления вторичных обмоток трансформатора

$$R_{21} = R'_{21} / k^2, \quad x_{21} = x'_{21} / k^2. \quad (3.24)$$

Индуктивность вторичной обмотки

$$L_{21} = x_{21} / 2\pi f. \quad (3.25)$$

Для повышения качества выходного напряжения АИ и уменьшения влияния коммутационных перенапряжений, возникающих при работе силовых электронных приборов, на источники электроэнергии важно точно определить параметры выходного и входного фильтра.

Аналитически сложно описать гармонический состав выходного напряжения АИ с широтной импульсной его модуляцией. Что затрудняет разработку точных методов расчёта выходного фильтра преобразователя. Однако, если учесть дискретность параметров реальных элементов пассивного Г-образного LC-фильтра, практическая точность таких методов не высокая. Поэтому в настоящее время в основу методик расчета пассивных фильтров инверторов положены вопросы оптимизации показателей их эффективности, которыми являются КПД и массогабаритные показатели.

Практика проектирования ИН показала, что, как правило, чем меньше масса фильтров, тем выше их КПД. Поэтому предлагается методика упрощенного расчета параметров LC-фильтров ИН, в основу которой положен критерий минимума массы и габаритов.

Расчёт параметров выходного фильтра начинается с определения скважности импульсов при ШИМ выходного напряжения

$$\lambda = \frac{t}{T_k}, \quad (3.26)$$

где t – суммарная длительность всех импульсов за период формирования выходного напряжения;

T_k – период коммутации, включая промежуток времени длительности импульсов и пауз.

Основным требованием, предъявляемым к выходным фильтрам инверторов, является обеспечение заданного значения коэффициента гармоник K_Γ значение которого можно определить по формуле

$$K_\Gamma = \frac{(R + R_H)T_K^2}{64R_H LC}, \quad (3.27)$$

где R – сопротивление, учитывающее общие потери в фильтре;

R_H – сопротивление нагрузки;

L и C – индуктивность и емкость фильтра соответственно.

Методика расчёта параметров входного и выходного Г-образного пассивного LC фильтров рассмотрены в п.2.1.

Расчёт параметров трёхфазной нагрузки, включенной по схеме «звезда», начинается с определения общего активного сопротивления одной фазы

$$R_{AH} = P_2 / 3I_{21}^2, \quad (3.28)$$

где P_2 – активная мощность нагрузки

$$P_2 = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_H, \quad (3.29)$$

где $U_{\phi} = 220 \text{ В}$ – фазное напряжение;

I_{ϕ} – фазный ток, определяется с учётом полной мощности S_2 ;

$\cos \varphi = 0,8$ – коэффициент мощности нагрузки.

Реактивная мощность нагрузки

$$Q_H = S_2 \sin \varphi_H. \quad (3.30)$$

Индуктивное сопротивление одной фазы нагрузки

$$x_H = Q_H / 3I_H^2. \quad (3.31)$$

Индуктивность одной фазы нагрузки

$$L_H = x_H / 2\pi f. \quad (3.32)$$

Полное сопротивление одной фазы нагрузки

$$Z_1 = \sqrt{R_H^2 + x_H^2}. \quad (3.33)$$

Приведенные значения параметров нагрузки определяются по формулам

$$Z_1' = Z_1 k^2, \quad R_H' = R_H k^2, \quad x_H' = x_H k^2. \quad (3.34)$$

Особенностью предложенной методики упрощенного расчёта параметров схемы замещения автономного инвертора на ТВМП является то, что при их расчёте не учитываются потери на вихревые токи в трансформаторе, кроме того, в конструкции активной части трансформатора, выполненного на асинхронном двигателе с фазным ротором, исключён воздушный зазор, при

этом, отклонение основных показателей оценки эффективности (масштабных показателей и КПД) по сравнению с известными методиками расчета инверторов и электрических машин не превышает 3 %.

3.4 Результаты компьютерного моделирования режимов работы инвертора на трансформаторе с вращающимся магнитным полем

Основной целью компьютерного моделирования являлось на основании анализа полученных результатов разработать рекомендации по проектированию энергоэффективных АИ на ТВМП.

Основные задачи компьютерного моделирования:

- получить амплитудные значения напряжений и токов на элементах схемы замещения и на нагрузке в нормальных и аварийных режимах работы;
- определить длительности переходных процессов в нормальных и аварийных режимах работы;
- определить гармонический состав выходного напряжения инвертора при ШИМ выходного напряжения с разным количеством импульсов моделирования.

В процессе моделирования были получены семейства динамических характеристик для различных режимов работы АИ.

На рисунке 3.5 приведены графики ШИМ выходного напряжения инвертора при модуляции с 5 и 9 импульсами.

На рисунке 3.6 приведены графики спектрального состава выходного напряжения инвертора. Как видно из графиков при модуляции выходного напряжения, используя 9 импульсов, спектральный состав выходного напряжения значительно лучше, чем при модуляции выходного напряжения, используя 5 импульсов.

На рисунке 3.7 приведена форма тока на выходе однофазного инвертора без подключенного выходного фильтра (рисунок 3.1).

На рисунке 3.8 приведены временные диаграммы фазных токов нагрузки, а на рисунке 3.9 – фазных напряжений и фазных токов.

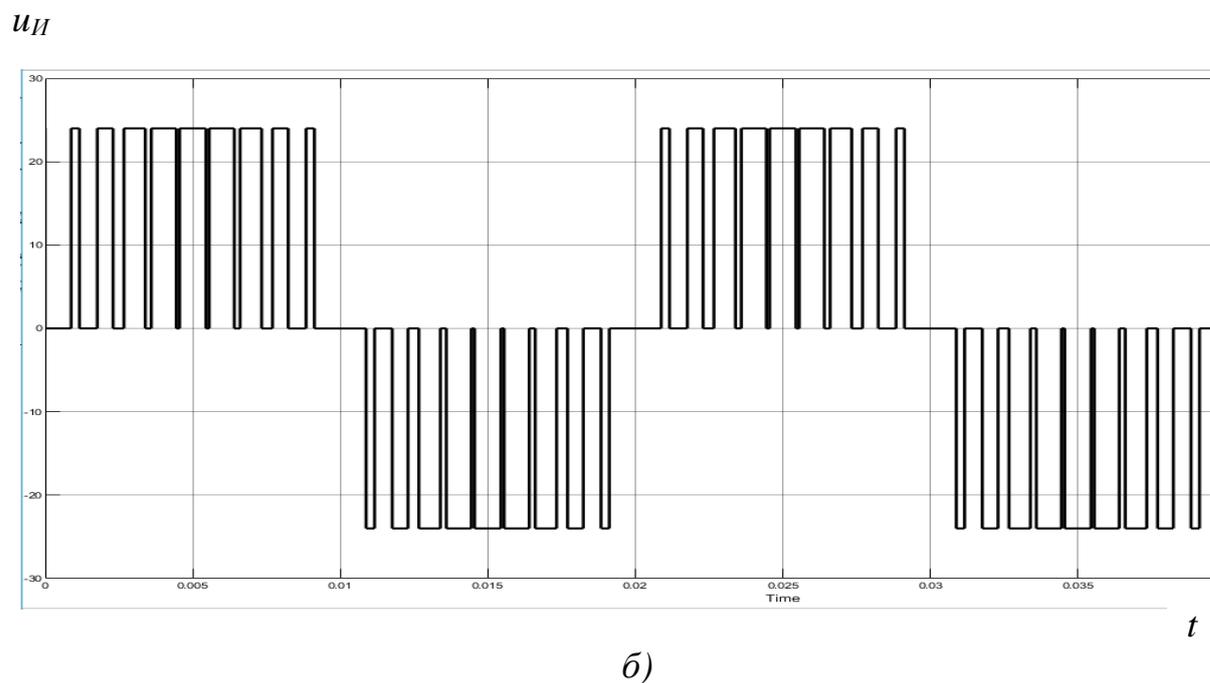
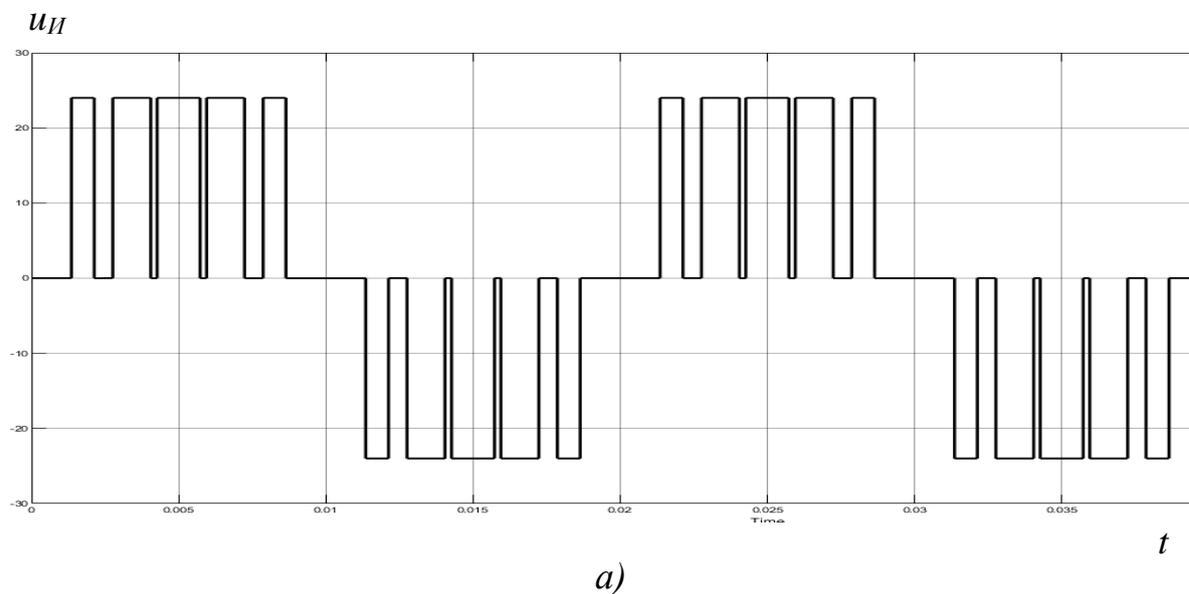
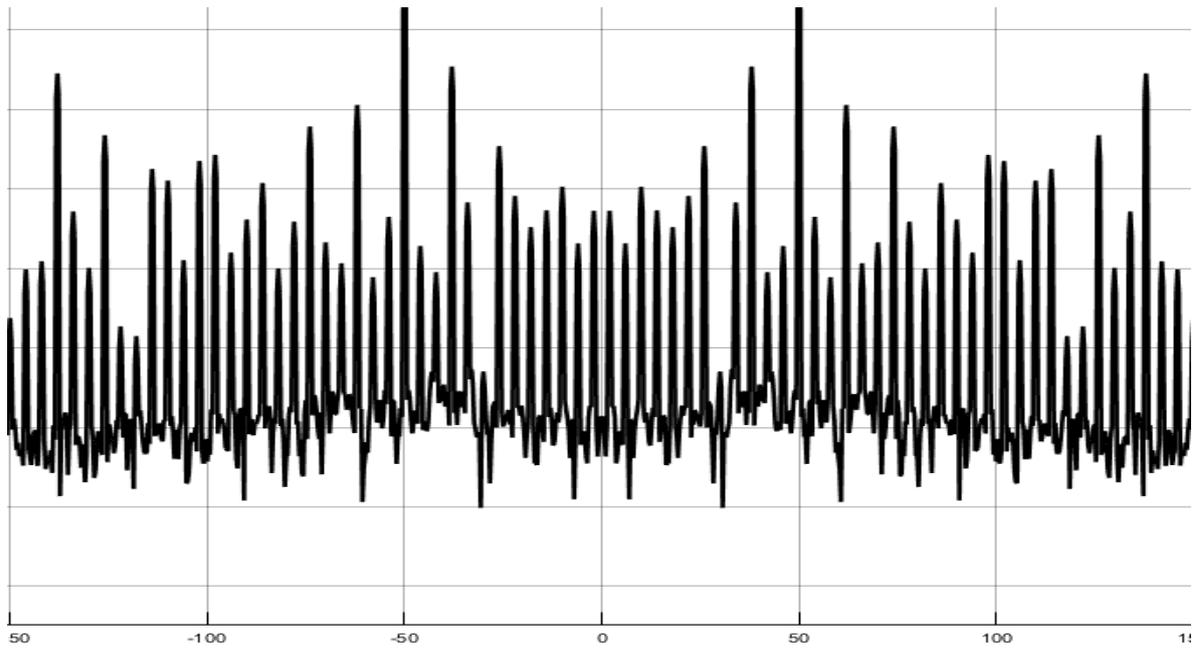


Рисунок 3.5 – ШИМ выходного напряжения однофазного инвертора:

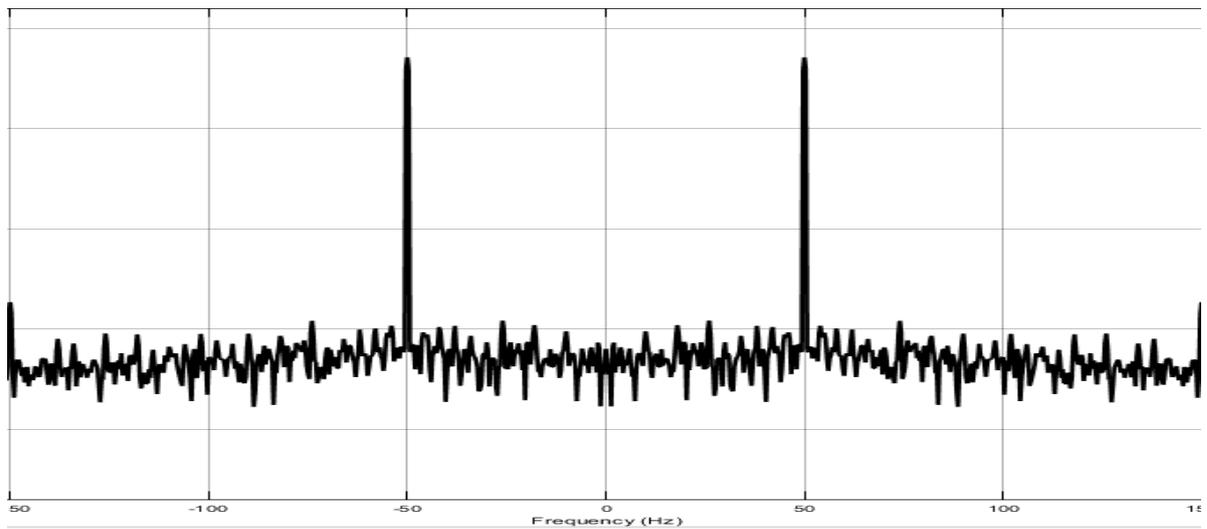
а) – 5 импульсов; б) 9 – импульсов

A



a)

A



б)

Рисунок 3.6 – График спектрального анализа выходного напряжения инвертора: *a)* – ШИМ с 5 модулирующих импульсов; *б)* – ШИМ с 9 модулирующих импульсов

Результаты компьютерного моделирования показали, что при проектировании АИ на ТВМП необходимо учитывать следующие факторы, оказывающие влияние в целом на эксплуатационно-технические, в том числе и энергетические характеристики преобразователя:

1) улучшить характеристики фильтра инвертора можно за счёт улучшения спектрального состава выходного напряжения электронной схемы преобразования постоянного тока в переменный, при этом, модулирующих импульсов при ШИМ выходного напряжения должно быть не менее девяти;

необходимого его качества, можно при изменении модулирующих импульсов от 9 до 13 при формировании одной полуволны;

3) длительность переходных процессов на выходе инвертора зависит от параметров выходного фильтра, с учётом обеспечения требуемого качества напряжения и минимальной длительности переходных процессов параметры Г-образного фильтра должны изменяться в пределах: ёмкость C^*_B от 0,9 до 1,4, индуктивность от 3 до 5;

4) длительность переходных процессов не значительно зависит от количества модулирующих импульсов, а в основном определяется характером нагрузки. Так при значении коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,8$ длительность переходных процессов в нормальном режиме работы не превышает 0,03 с;

5) при КЗ в первичных обмотках ТВМП необходимо предусмотреть защиту, которая бы снимала управляющие сигналы с транзисторов инвертора, тем самым, обеспечивая разрыв связи между солнечными батареями и трансформатором;

6) для защиты АИ от аварийных режимов работы в нагрузке достаточно применять автоматические выключатели или быстродействующие плавкие предохранители.

i_{II}

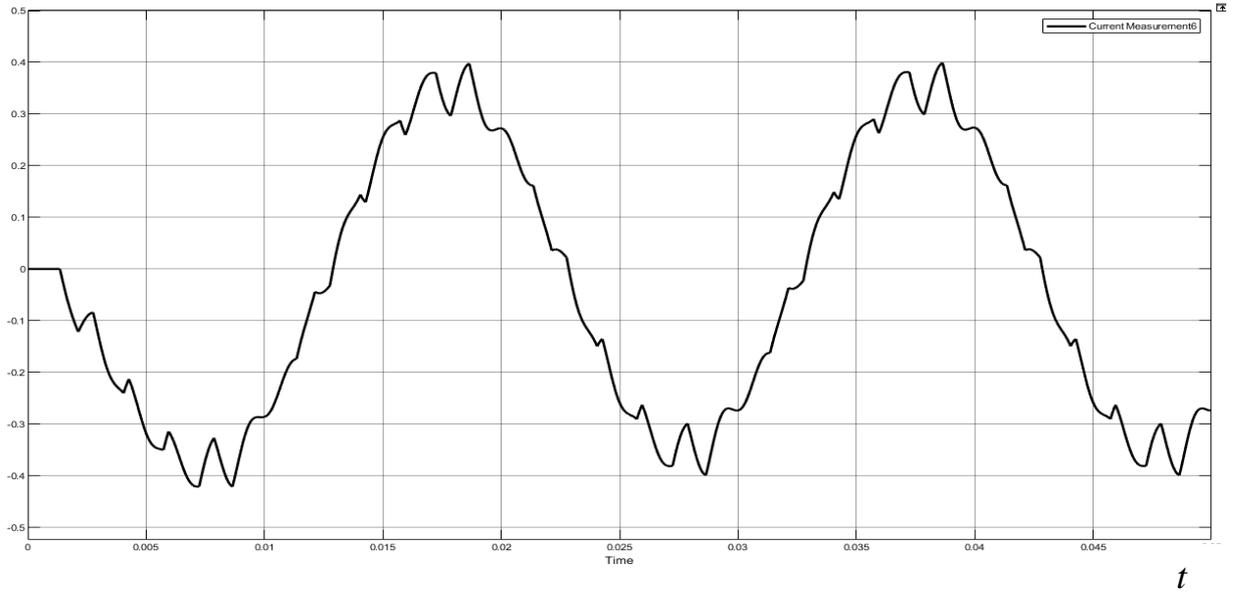


Рисунок 3.7 – Форма тока на выходе однофазной схемы инвертора

i

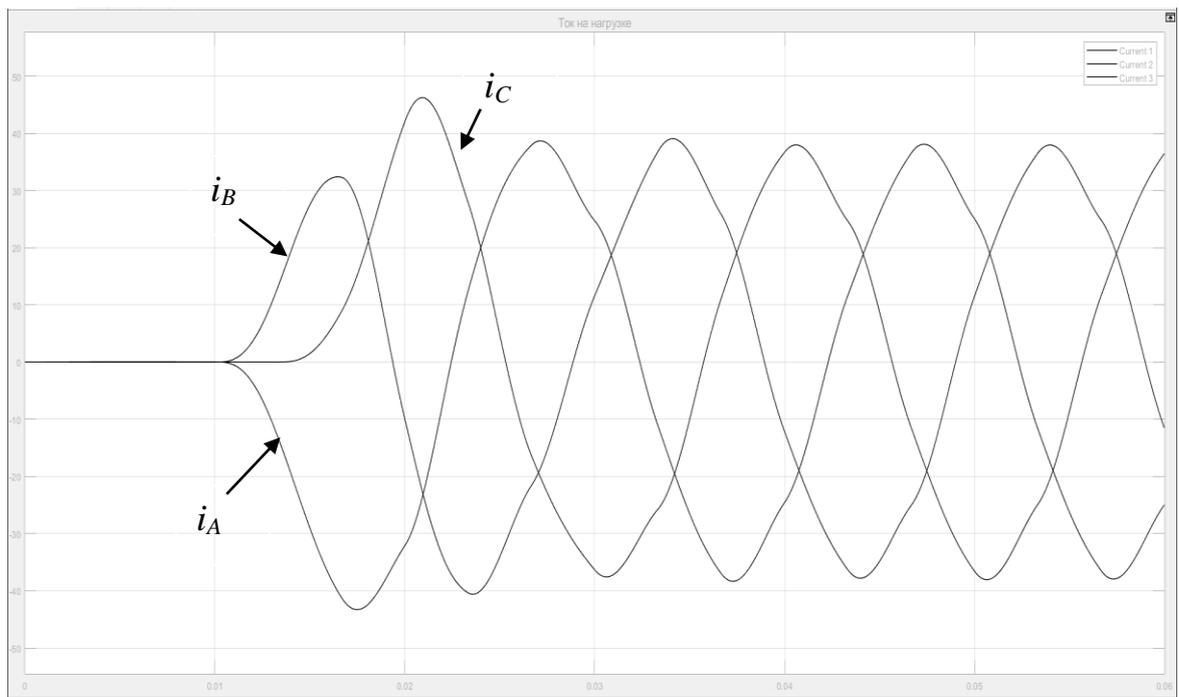


Рисунок 3.8 – Токи в трёхфазной симметричной нагрузке

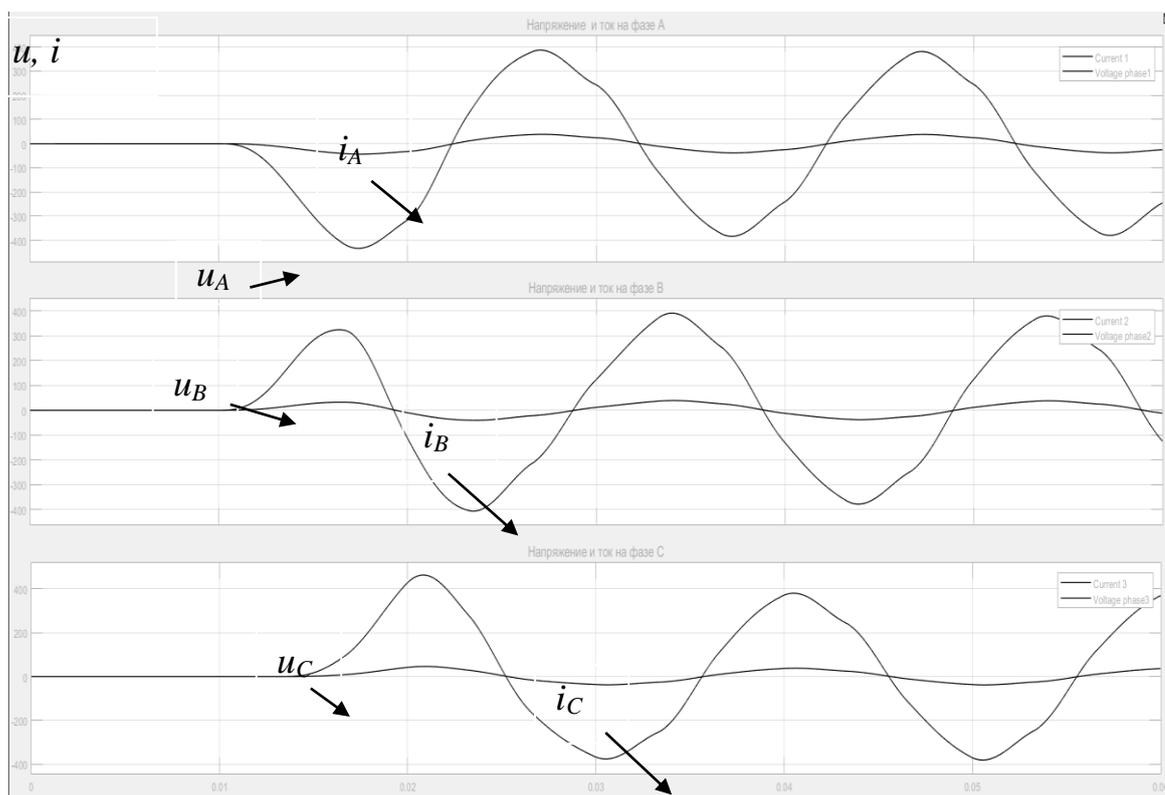


Рисунок 3.9 – Временные диаграммы фазных напряжений и токов на нагрузке

3.5 Выводы

Для исследования работы АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП разработана принципиальная электрическая схема замещения, состоящая из двух блоков: источник напряжения постоянного тока, входной фильтр, силовая схема преобразования, выходной фильтр, первичные обмотки ТВМП, которые являются нагрузкой для автономного инвертора; вторичные обмотки ТВМП, трёхфазная нагрузка. Разработана методика инженерного расчёта параметров схемы замещения АИ на ТВМП с подключенным источником и нагрузкой.

Разработана компьютерная блок-схема АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП с использованием программы MATLAB (версия R2018) и приложения Simulink. В процессе моделирования получены семейства динамических ха-

рактик для различных режимов работы АИ, характеризующие амплитудные значения токов и напряжений, переходные процессы и спектральный состав выходного напряжения электронной схемы преобразователя.

Результаты компьютерного моделирования показали, что при проектировании АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП необходимо учитывать следующие факторы, оказывающие влияние на характеристики преобразователя:

– улучшить характеристики фильтра инвертора можно за счёт улучшения спектрального состава выходного напряжения электронной схемы преобразования постоянного тока в переменный, при этом модулирующих импульсов при ШИМ выходного напряжения должно быть не менее девяти;

– увеличить диапазон регулирования напряжения, при обеспечении необходимого его качества, можно при изменении модулирующих импульсов от 9 до 13 при формировании одной полуволны;

– длительность переходных процессов на выходе инвертора зависит от параметров выходного фильтра, с учётом обеспечения требуемого качества напряжения и минимальной длительности переходных процессов параметры Г-образного фильтра должны изменяться в пределах: ёмкость C^*_B от 0,9 до 1,4, индуктивность от 3 до 5;

– длительность переходных процессов незначительно зависит от количества модулирующих импульсов, а в основном определяется характером нагрузки. Так, при значении коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,8$, длительность переходных процессов в нормальном режиме работы не превышает 0,03 с;

– при КЗ в первичных обмотках ТВМП необходимо предусмотреть защиту, которая бы снимала управляющие сигналы с транзисторов инвертора, тем самым обеспечивая разрыв связи между солнечными батареями и трансформатором;

– для защиты АИ от аварийных режимов работы в нагрузке достаточно применять автоматические выключатели или быстродействующие плавкие предохранители.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1 Методика экспериментальных исследований и электрооборудование

Для подтверждения результатов теоретических исследований разработан испытательный стенд (рисунок 4.1) по исследованию работы однофазно-трёхфазного ТВМП, выполненного на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рисунок 4.1 – элемент 1) и асинхронного двигателя с фазным ротором (рисунок 4.2).

В состав оборудования испытательного стенда входят (рисунок 4.1):

- Латр, элемент 3 – выполняет функции инвертора – источника напряжения однофазного переменного тока;
- осциллограф, элемент 2;
- блок измерительных приборов, элемент 4.

Целью исследования было получение и оценка качества трёхфазной симметричной системы напряжений, получаемой из однофазного напряжения переменного тока, используя в качестве ТВМП асинхронный двигатель с короткозамкнутым (рисунок 4.1) и фазным ротором (рисунок 4.2).

На рисунке 4.3 приведены фотографии блока фазосдвигающих конденсаторов, которые подключались к первичным обмоткам ТВМП для обеспечения электрического сдвига токов в первичных обмотках и создания вращающегося магнитного поля. Изменение ёмкости конденсаторов осуществляется с помощью трёхфазных автоматических выключателей (рисунок 4.3, а). На рисунке 4.3, б приведены конденсаторные батареи, изменение ёмкости которых позволяет стабилизировать напряжение.

На рисунке 4.1 показан асинхронный двигатель с коротко короткозамкнутым ротором 1, мощностью 400 Вт, а на рисунке 4.3 – асинхронный двигатель с фазным ротором мощностью 1 кВт. Роторы электрических машин жёстко зафиксированы к корпусу.

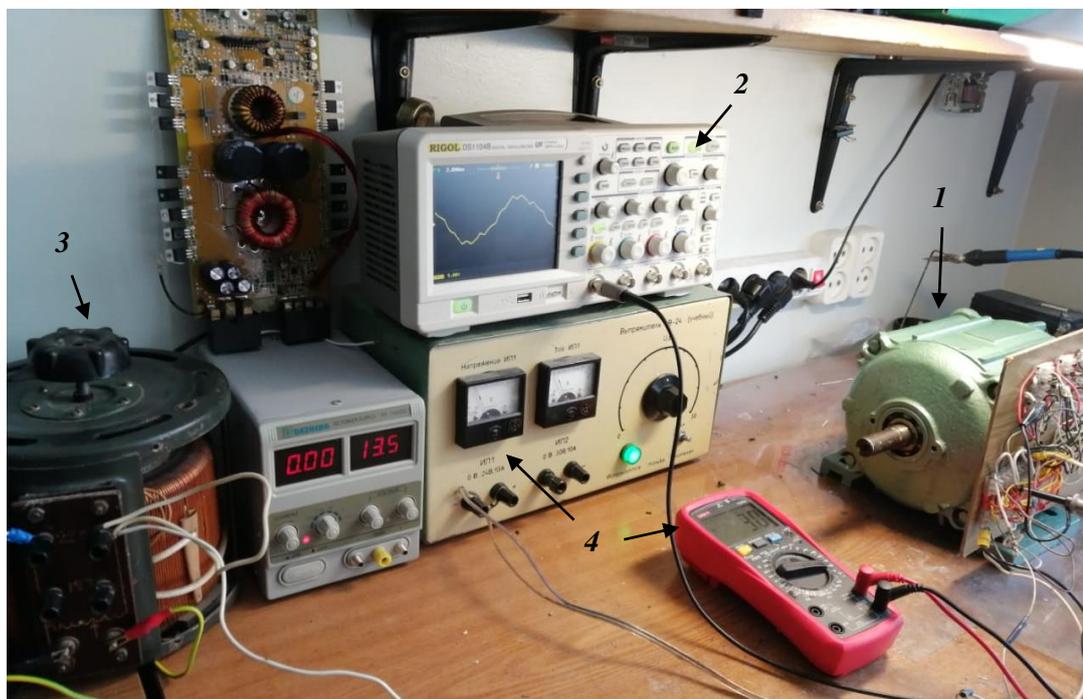


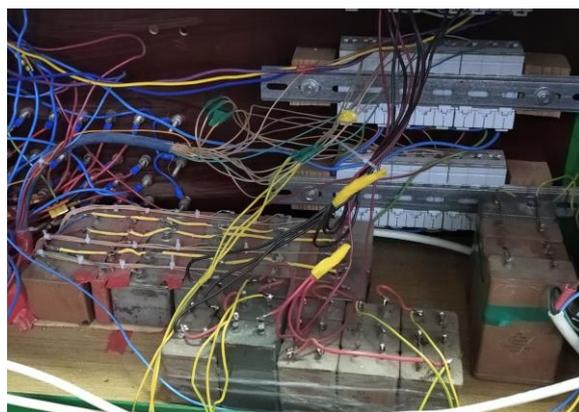
Рисунок 4.1 – Внешний вид испытательного стенда:
1 – ТВМП; 2 – осциллограф; 3 – латр; 4 – измерительные приборы



Рисунок 4.2 – ТВМП на асинхронном двигателе с фазным ротором



а)



б)

Рисунок 4.3 – Блок фазосдвигающих конденсаторов:
а) – передняя панель; б) – конденсаторы блока

Для проведения экспериментальных исследований разработана развёрнутая электрическая схема первичных и вторичных обмоток ТВМП (рисунок 4.4), принципиальная электрическая схема которого приведена на рисунке 2.9.

Методика проведения экспериментальных исследований включает проведение следующих испытаний: с помощью латра (элемент 3 рисунок 4.1) подавать переменное напряжение от 24 до 48 В на первичные обмотки ТВМП; измерять величину напряжения на входе и выходе ТВМП; на всех этапах измерения напряжения фиксировать его значение и форму с помощью осциллографа на выходе ТВМП.

4.2 Экспериментальные исследования

При исследовании ТВМП, выполненного на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором первичные и вторичные обмотки укладывались в пазы статора электрической машины. При исследовании ТВМП, выполненного на асинхронном двигателе с фазным ротором первичные обмотки укладывались в пазы ротора.

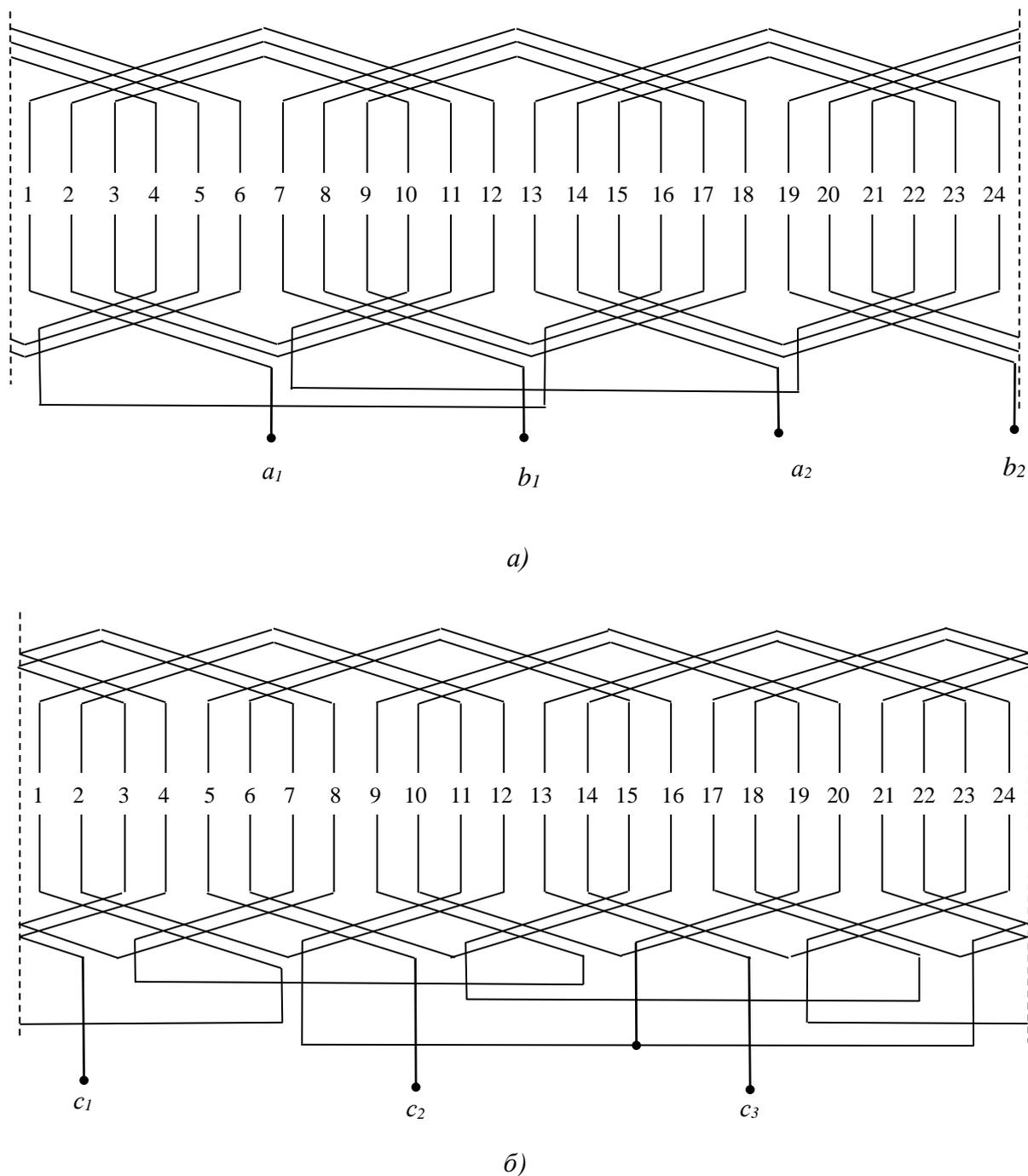


Рисунок 4.4 – Развёрнутая схема обмоток ТВМП:
 а) – первичных однофазных; б) – вторичных трёхфазной системы

На рисунке 4.5 приведены осциллограммы трёхфазной системы напряжения, на выходе ТВМП, выполненного на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, а на рисунке 4.6 – с фазным ротором. Как видно

из рассмотренных рисунков на выходе ТВМП, выполненного на электрической машине с фазным ротором, форма трёхфазной системы напряжений имеют меньшие искажения.

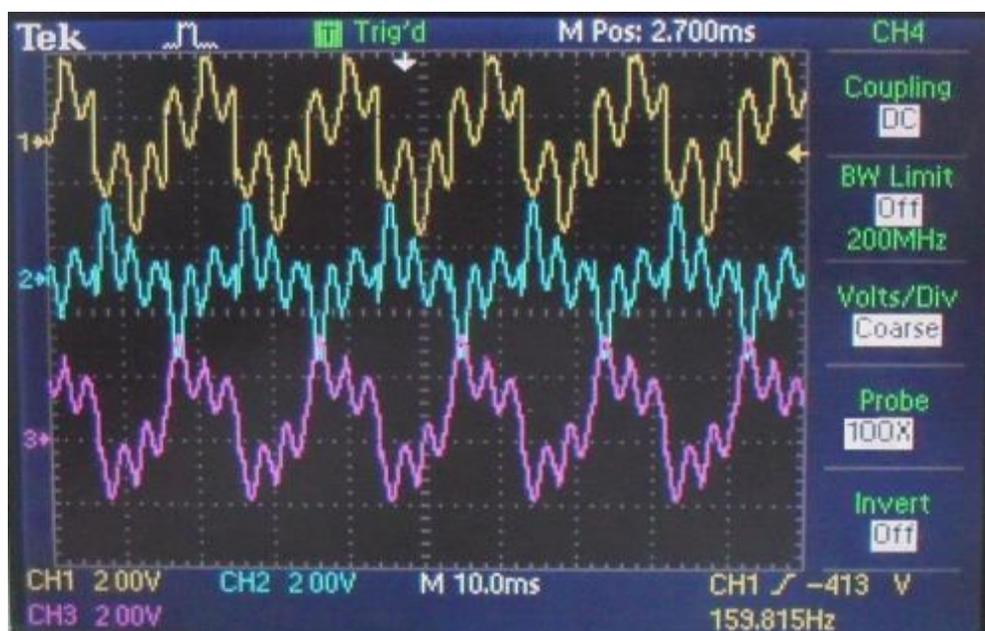


Рисунок 4.5 – Осциллограммы трёхфазной системы напряжений ТВМП, выполненного на асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором

Как известно, что одним из критериев характеризующих достоверность исследований является совпадение основных характеристик, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований. Оценка выполнимости этого требования может быть осуществлена по усредненным значениям рассогласования характеристик, полученных при компьютерном моделировании с характеристиками, полученными при экспериментальных исследованиях. Задача решалась с помощью метода статической оценки точности результатов исследований, проводимых на физической модели [36, 40].

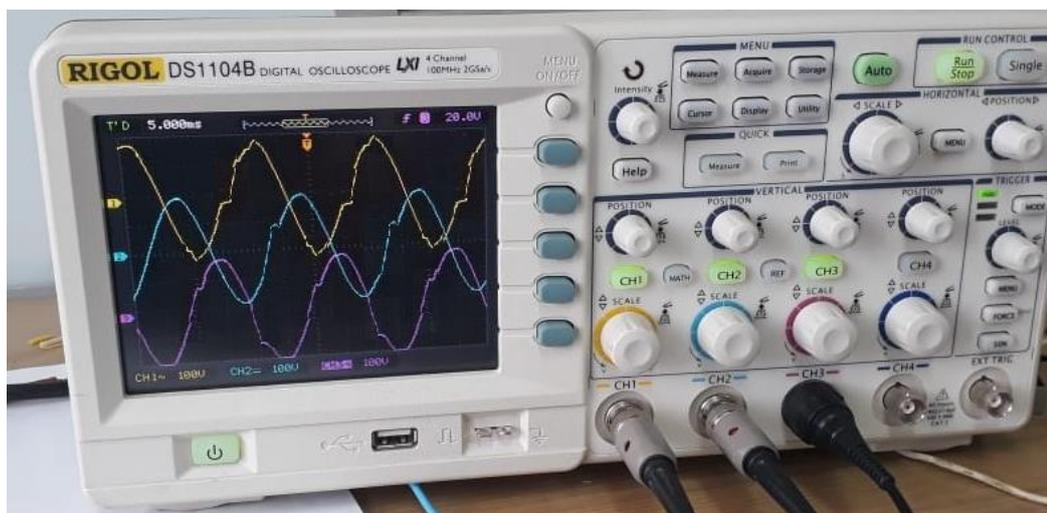


Рисунок 4.6 – Осциллограммы трёхфазной системы напряжений ТВМП, выполненного на асинхронном двигателе с фазным ротором

Поскольку эксперимент проводился только на ТВМП, то проводилось сравнение его электрических параметров (действующих значений напряжения и тока, а также длительность переходных процессов) с параметрами трансформатора, полученными в результате компьютерного моделирования. .

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, представляющие собой действующие значения фазного напряжения и тока на нагрузке U_H и I_H , а также время длительности переходных процессов t_{III} ;

X – управляющее воздействие, изменяемое в процессе эксперимента, в качестве которого была выбрана мощность нагрузки P_H .

Область определения управляющего воздействия X была задана исходя из анализа возможных режимов работы физической модели и составляла $0; 0,5P_H; P_H$.

Оценка достоверности полученных результатов проводилась следующим образом. Количество измерений физических параметров для определе-

ния Y_1, Y_2, Y_3 составило – 10 при каждом значении. 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, определяемое выражением

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

Основные данные статической обработки результатов приведены в таблице 4.1, где Δ – отклонение исследуемого параметра от среднего значения. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и исследований на физической модели дало хорошее совпадение доверительных границ (расхождение не более $\pm 5,5\%$) и средних значений (расхождение от -4,05 до +5,5%).

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

P	U		$\Delta, \%$	I		$\Delta, \%$	t_{III}		$\Delta, \%$
	Среднее значение, B			Среднее значение, A			Среднее значение, mc		
	ЭИ	КМ	ЭИ	КМ	ЭИ	КМ			
0	225	220	-2,3	0	0	0	0	0,12	0
$0,5P_H$	214	223	+4,1	1,0	0,95	-5	127	122	-4,0
P_H	206	218	+5,5	1,45	1,52	+4,6	136	141	+3,6

Таким образом, приведенные экспериментальные исследования подтверждают достоверность полученных теоретических выводов не только по исследованию ТВМП, но и АИ, выполненного на его базе, т. к. компьютерная и метод описания схемы замещения инвертора остаются одними и теми же.

4.3 Техничко-экономическое обоснование постановки на серийное производство солнечных фотоэнергетических установок малой мощности

В настоящее время на территории Краснодарского края зарегистрировано более 14 тыс. фермерских (крестьянских) хозяйств и 827 тыс. личных подсобных хозяйств. При этом доля производства основных видов сельскохозяйственной продукции в этих хозяйствах в 2020 г. составляет: шерсти – 23 %; овощей, включая картофель – 37,7 %; плоды и ягоды 4,8 %; мёд 2,6 % (Краснодарский край в цифрах. 2020. Стат. Сб. / Краснодарстат – Краснодар, 2021. – 274 с.

Для обеспечения малых фермерских и личных подсобных хозяйств СФЭУ малой мощности (до 5 кВт) в Краснодарском крае необходимо организовать серийное производство адаптированных к конкретным сельскохозяйственным потребителям установок. Такое производство может быть организовано на базе известных в крае предприятий ООО «Солнечный центр», ООО «Энерготехнологии-Сервис» и др., которые имеют соответствующее оборудование и производственные мощности. Целесообразно расчет технико-экономических показателей провести с расчета на 100 хозяйств, что будет ориентиром для дальнейших разработок СФЭУ для сельскохозяйственного производства Краснодарского края.

На первом этапе необходимо произвести расчет затрат на стадии исследования и разработки. Основным допущением при расчете принято, что производство работ сторонними организациями, командировочные расходы, амортизационные отчисления на оборудование не будет учитываться.

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

$$Z_{\text{НИОКР}} = Z_{\text{O}} + Z_{\text{Д}} + Z_{\text{Э}} + H + Z_{\text{СК}} \cdot K_{\text{ТР}}, \quad (4.4)$$

где Z_{O} – 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 СФЭУ складывается из расходов по следующим статьям: заработная плата разработчиков; затраты на энергоносители; затраты на комплектующие.

Сведения расходов на заработную плату разработчиков СФЭУ приведены в таблице 4.2. Данные по зарплате брались по среднему уровню по соответствующей отрасли в Краснодарском крае за 2020 год на примере ООО «Солнечный центр» и «Энерготехнологии-Сервис».

Для повышения качества и ускорения работ устанавливается надбавка к зарплате в размере 20 % от основной.

$$Z_D = 30920 \cdot 0,2 = 6184 \text{ руб.}$$

Общий процент начислений составит: ПФР – 22 %, ФМС – 5,1%, ФСС – 2,9 %, ФСС травматизм – 1 %, итого – 31 %. Таким образом, суммарный коэффициент начислений $K_H = 1,31$. Общий фонд заработной платы с начислениями

$$Z_{ОБЩ} = Z_О + Z_D + \frac{Z_О + Z_D}{100} K_H. \quad (4.5)$$

Тогда в соответствии с (5.2) общие затраты на заработную плату составят

$$Z_{ОБЩ} = 30920 + 6184 + \frac{30920 + 6184}{100} 1,31 = 37590 \text{ руб.}$$

Принимаем накладные расходы в размере 30 % от общего фонда заработной платы. Эти включают в себя стоимость проведения патентного поис-

ка, изучение технической и научной литературы, а также стоимость заявки на оформление патента (полезной модели)

$$H = 37590 \cdot 0,3 = 11277 \text{ руб.}$$

Таблица 4.2 – Заработная плата разработчиков СФЭУ

№ п/п	Этапы разработки	Исполнители	Почасовая ставка руб.	Количество исполнителей	Трудоемкость, ч.	Затраты руб.
1	Получение ТЗ и разработка ТУ на схемное решение установки	Ведущий инженер	500	1	14	7000
2	Разработка схемы установки	Инженер	450	1	3	1350
3	Изготовление (сборка) лабораторного образца	Техник	350	1	12	4200
4	Испытания новой установки	Инженер	450	1	16	7200
		Техник	350	1	4	1400
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						30920

Затраты на энергоносители включают в себя затраты на расход электроэнергии, водоснабжение, газ и канализацию. С учётом опыта работы ООО «Солнечный центр» и «Энерготехнологии» эти затраты на период проведения НИОКР не превышают $Z_3 = 1000 \text{ руб.}$

В таблице 4.3 приведены сведения о стоимости основных функциональных элементов СФЭУ мощностью 3 кВт и комплектующих. Современный солнечный модуль PLM-250P-60 имеет мощность 250 Вт, для обеспечения мощности СФЭУ 3 кВт, необходимо 12 таких панелей. Для обеспечения работы потребителей собственных нужд необходима только одна аккумуляторная батарея, выбираем модель GX12-50 емкостью 50 А·ч. Для преобразования напряжения постоянного тока в переменный выбрана силовая схема

автономного солнечного инвертора напряжения SmartWatt 24V с номинальной мощностью 3200 Вт. Однофазный трансформатор заменен однофазным ТВМП, выполненный на базе асинхронного двигателя с фазным ротором. Таким образом, суммарные затраты на функциональные элементы СФЭУ и комплектующие $Z_{СК} = 277500$ руб.

Таблица 4.3 – Комплектующие СФЭУ мощностью 3 кВт

№ п/п	Наименование	Цена, руб	Количество	Общая цена, руб
1	Солнечный модуль PLM-250P-60	16500	12	198000
2	Силовая схема на базе инвертор SmartWatt 24V с ТВМП	43200	1	43200
3	Контроллер PWM 2440	4100	1	4100
4	Аккумуляторная батарея модель GX12-200	6300	1	6300
5	Комплектующие, включая транспортное средство (прицеп)	30000	1	25900
ИТОГО				277500

Общие затраты на проведение НИОКР составляют

$$Z_{НИОКР} = 30920 + 6184 + 1000 + 11277 + 277500 \cdot 1,05 = 340756 \text{ руб.}$$

В таблице 4.4 приведена полная калькуляция себестоимости производства одной СФЭУ мощностью 3 кВт. Основная заработная плата производственных рабочих начисляется с учетом выполнения технологических операций, связанных с выполнением сборочно-монтажных и регулировочных работ составляет примерно 10000 руб.

Таким образом, полная себестоимость производства одной СФЭУ составляет

$$C_{II} = 377625 \text{ руб.}$$

Валовую прибыль примем в размере 25 % от себестоимости

$$П_B = C_{II} \cdot 0,25 = 377625 \cdot 0,25 = 94406 \text{ руб.}$$

Тогда оптовая цена установки составит

$$C_{\text{ОПГ}} = C_{\text{П}} + П_{\text{В}} = 377625 + 94406 = 472031 \text{ руб.}$$

Договорная цена с учетом 18 % НДС

$$C_{\text{дог}} = 472031 \left(1 + \frac{18}{100} \right) = 556997 \text{ руб.}$$

Таблица 4.4 – Полная калькуляция себестоимости производства одной СФЭУ мощностью 3 кВт

№ п/п	Статья калькуляции	Сумма, руб
1	Стоимость функциональных элементов (солнечных модулей, инвертор, контроллер, аккумуляторная батарея)	251600
2	Комплекующие изделия	25900
3	Основная зарплата производственных рабочих	10000
4	Начисления на зарплату в различные фонды	89125
5	Стоимость израсходованных энергоресурсов	1000
ИТОГО		377625

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

$$П = П_{\text{В}} \left(1 - \frac{\text{НП}}{100} \right) = 94406 \cdot \left(1 - \frac{20}{100} \right) = 75525 \text{ руб.}$$

Годовая прибыль от реализации 100 СФЭУ составит

$$П_{\text{Г1}} = 7552500 \text{ руб.}$$

При расчёте капитальных затрат (K_3) на производство 100 СФЭУ, учитываются затраты на проведение НИОКР ($Z_{\text{НИОКР}}$) и затрат на освоение производства и доработку опытных образцов, корректировку документации ($K_{\text{Д}}$)

$$K_3 = Z_{\text{НИОКР}} + 1,05(n \cdot C_{\text{П}}) = 340756 + 1,05(100 \cdot 377625) = 39991381 \approx 40 \text{ млн. руб.}$$

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

$$K_{\text{ОС}} = 0,1(n \cdot C_{\text{П}}) = 0,1(100 \cdot 377625) = 3776250 \text{ руб.}$$

Капиталовложения в производственные фонды ($K_{ПФ}$) с учетом, что производство осуществляется на имеющемся оборудовании предприятия и капиталовложения в основные фонды составляет $K_{ОФ}=500000$ руб

$$K_{ПФ} = K_{ОС} + K_{ОФ} = 3775250 + 500000 = 4275250 \text{ руб.}$$

Тогда полные капиталовложения

$$K_{П} = K_{З} + K_{ПФ} = 39991381 + 4275250 = 44266631 \text{ руб.}$$

Для реализации проекта берется кредит в Сбербанке $K_K = 45$ млн руб. под 11 % (E_K) годовых с равномерными выплатами по кредиту в течение $T_K = 10$ лет. Расчет выплат по кредиту проводится с учётом формулы:

$$K_m = \frac{E_K (1 + E_K)^{T_K}}{(1 + E_K)^{T_K} - 1} K_K, \quad (5.2)$$

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

$$K_m = \frac{0,11(1+0,11)^{10}}{(1+0,11)^{10} - 1} 45000000 = 7640217 \text{ руб.}$$

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

$$K_m = 7640217 \cdot 10 = 76402170 \text{ руб.}$$

Чистый дисконтированный доход определяется по формуле

$$ЧДД = \sum_{m=1}^{T_K} \frac{\Pi_{Г1} - K_m}{(1 + E)^m} - K_{П}, \quad (5.3)$$

где $E = 0,07$ норма дисконта.

$$ЧДД = \sum_{m=1}^6 \frac{7552500 - 76402170}{(1 + 0,07)^6} - 44266631 = 8600869 \text{ руб.}$$

Таким образом, через 6 лет после эксплуатации СФЭУ они будут приносить прибыль, т. е. их эффективность очевидна, поскольку капитальные затраты окупаются с учётом ежегодной выплаты кредита.

Результаты технико-экономического расчёта приведены в таблице 4.5. Из результатов технико-экономического обоснования постановки на серий-

ное производство СФЭУ малой мощности (таблица 5.4) видно, что предприятия, разрабатывающие установки после 6 лет их эксплуатации получают прибыль, что позволяет им увеличить производство за счёт собственных средств без кредита.

Таблица 4.5 – Результаты технико-экономического расчёта

№ п/п	Критерии оценки	Показатели
1	Затраты на НИОКР, руб	340756
2	Себестоимость производства одной установки, руб	377625
3	Годовая прибыль от реализации одной установки, руб	75525
4	Количество выпускаемых СФЭУ, шт	100
5	Полные капиталовложения, млн. руб	44,26
6	Кредит, млн. руб	45
7	Ежегодный платеж по кредиту, млн. руб	7,64
8	Срок окупаемости, лет	5,8

4.4 Выводы

Для подтверждения результатов теоретических исследований разработана экспериментальная установка по исследованию работы однофазно-трёхфазных ТВМП, выполненных на асинхронном двигателе с короткозамкнутым и фазным ротором. В первом случае первичная и вторичная обмотки ТВМП размещаются на статоре, а во втором: первичные – в пазах ротора, а вторичные – в пазах статора. Исследования показали, что ТВМП, выполненный на электрической машине с фазным ротором, имеет улучшенный спектральный состав выходного напряжения, чем ТВМП, выполненный на базе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

Оценка достоверности результатов математического моделирования проводилась с использованием метода статической оценки точности результатов исследований, проводимых на физической модели. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и исследований на физической мо-

дели дало хорошее совпадение доверительных границ (расхождение не более $\pm 5,5\%$) и средних значений (расхождение от $-4,05$ до $+5,5\%$).

Проведено технико-экономическое обоснование постановки на серийное производство СФЭУ мощностью 3 кВт. Проведен расчёт затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Определена себестоимость одной установки, а также проведен расчет капитальных и эксплуатационных затрат на 100 установок. Расчёты показали, что капитальные затраты на 100 установок составили 44,26 млн. руб. Для реализации проекта необходимо взять кредит. Расчет чисто дисконтированного дохода показал, что даже при выплате ежемесячного кредита 7,64 млн. руб. срок окупаемости СФЭУ составит 5,8 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Широкие перспективы раскрываются перед СФЭУ, осуществляющими электроснабжение МФХ и ЛПХ, занимающихся производством мёда, мяса, шерсти, рыбы, а также обеспечивающими комфортные бытовые условия обслуживающему персоналу. Важным функциональным элементом СФЭУ является солнечный АИ, осуществляющий преобразование напряжения постоянного тока в переменный. Эксплуатационные характеристики АИ оказывают существенное влияние на характеристики СФЭУ в комплексе. Раскрыты недостатки эксплуатируемых АИ и направления улучшения их эксплуатационно-технических характеристик.

2. Разработаны критерии оценки эффективности автономных инверторов СФЭУ, включающие оценку КПД, массогабаритных показателей, показателей качества напряжения, а также показателей активной, реактивной и полной мощности.

Расчёты показали, что энергетические показатели АИ (активной, реактивной полной мощности и КПД) в основном зависят от количества и скважности импульсов ШИМ, которые оказывают влияние на значение коэффициента гармоник K_G . Определено, что скважность импульсов λ для обеспечения небольших значений амплитуды высших гармоник должна изменяться в пределах от 0,8 до 1, при этом выходной фильтр необходимо настраивать для подавления (в резонанс) с 9-й гармоникой. Для расширения диапазона регулирования напряжения при значениях скважности импульсов λ от 0,6 до 1 выходной фильтр должен быть настроен для подавления 5-й гармоники. При этом максимальным КПД автономного инвертора будет, если количество модулирующих импульсов i находится в пределах от 5 до 9.

Получены зависимости КПД и удельной массы АИ на ТВМП при мощностях 3 и 5 кВт при входных напряжениях источника напряжения постоянного тока 24 и 48 В. Показано, что КПД АИ при напряжении 48 В при мощ-

ностях преобразователя меньше 3 кВт больше 4–6 % в сравнении с АИ с входным напряжением 24 В. При мощности от 3 кВт и больше КПД не отличается больше чем на 2 %. Удельная масса АИ при напряжении источника 48 В на 2–3 кг/кВА меньше.

3. Разработаны функциональные схемы трёхфазных АИ, выполненные на однофазной мостовой силовой электронной схеме и однофазно-трёхфазном ТВМП с улучшенными эксплуатационно-техническими и энергетическими характеристиками. Раскрыты особенности их работы, достоинства и недостатки.

4. Разработана принципиальная электрическая схема АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП, выполненная с использованием микропроцессорной техники, и алгоритм работы системы управления по преобразованию и стабилизации напряжения для разработки программы.

5. Разработана электрическая схема замещения АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП с подключенным источником и нагрузкой и методика инженерного расчёта параметров схемы замещения.

6. Разработана компьютерная блок-схема АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП с использованием программы MATLAB (версия R2018) и приложения Simulink. Результаты моделирования показали, что при проектировании АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП необходимо учитывать следующие факторы, оказывающие влияние на характеристики преобразователя:

– улучшить характеристики фильтра и энергетические показатели АИ, а также увеличить диапазон стабилизации выходного напряжения можно за счёт улучшения спектрального состава выходного напряжения электронной схемы преобразования, за счёт модулирующих импульсов – при ШИМ выходного напряжения их должно быть от 5 до 9;

– длительность переходных процессов на выходе инвертора зависит от параметров выходного фильтра, с учётом обеспечения требуемого качества напряжения и минимальной длительности переходных процессов параметры

Г-образного фильтра должны изменяться в пределах: ёмкость в относительных единицах от 0,9 до 1,4, индуктивность от 3 до 5;

– длительность переходных процессов незначительно зависит от количества модулирующих импульсов, а в основном определяется характером нагрузки, и при значении коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,8$ она не превышает 0,03 с.

7. Для подтверждения результатов теоретических исследований разработана экспериментальная установка по исследованию работы однофазно-трёхфазных ТВМП, выполненных на асинхронном двигателе с короткозамкнутым и фазным ротором. Исследования показали, что ТВМП, выполненный на электрической машине с фазным ротором, имеет улучшенный спектральный состав выходного напряжения, чем ТВМП, выполненный на базе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

Оценка достоверности результатов математического моделирования проводилась с использованием метода статической оценки точности результатов исследований, проводимых на физической модели. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и исследований на физической модели дало хорошее совпадение доверительных границ (расхождение не более $\pm 5,5\%$) и средних значений (расхождение от -4,05 до +5,5 %).

8. Проведено технико-экономическое обоснование постановки на серийное производство СФЭУ мощностью 3 кВт. Проведен расчёт затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Определена себестоимость одной установки, а также проведен расчет капитальных и эксплуатационных затрат на 100 установок. Расчёты показали, что капитальные затраты на 100 установок составили 44,26 млн. руб. Для реализации проекта необходимо взять кредит. Расчет чисто дисконтированного дохода показал, что даже при выплате ежемесячного кредита 7,64 млн. руб. срок окупаемости СФЭУ составит 5,8 лет.

Рекомендации производству

При производстве нового технического решения автономного солнечного инвертора, выполненного на базе однофазно-трёхфазного ТВМП, прежде всего необходимо учитывать рекомендации, приведенные в п. 9 заключения диссертационного исследования.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования должны быть направлены на исследование электромагнитной совместимости, основных функциональных элементов автономной солнечной энергосистемы с предлагаемым техническим решением автономного инвертора на ТВМП. Кроме того, необходимо разработать ТВМП на конструктивной базе электрических машин, но специально, работающий в режиме трансформатора, такой трансформатор будет иметь высокий КПД, за счёт исключения в конструкции воздушного зазора.

Для повышения показателей надежности необходимо разрабатывать автономные инверторы и основные функциональные элементы солнечных энергетических систем по модульному принципу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акулинин А. Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации. Проблемы региональной энергетики / А. Акулинин, В. Смыков. – 2008. – № 1. С. 23–30.
2. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т.38. №8. – С. 937–948.
3. Алхасов А. Б. Возобновляемая энергетика / А. Б. Алхасов // М.: ФИЗМАЛИТ, – 2010. – С. 256.
4. Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы II Международной НПК / А. П. Павлов; под ред. А. В. Павлова. – Саратов: Издательство «КУБиК», 2011. – 324 с.
5. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. – М.: КолосС, 2003. – 532 с.
6. 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.
7. Баскаков А. П. Нетрадиционные и возобновляемые источники электроэнергии : учебник для вузов [Текст] / А. П. Баскаков, В. А. Мунц– М. : Изд. дом «БАСТЕТ», 2013. – 368 с.
8. Безруких П. П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии / под ред. П.П. Безруких // СПб. : Наука, 2002. – 314 с.
9. Безруких П. П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии [Текст] / П. П. Безруких, Д. С. Стебков. – М. : РАСХН, 2005. – 274 с.

10. Безруких П. П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Д. С. Стребков // Малая энергетика. – М.: ОАО «НИИЭС». – 2005. – № 1–2
11. Борисов Р.И. Определение структуры и установленной мощности нетрадиционных источников электроэнергии / Р. И. Борисов, И. Е. Марончук, В. П. Буриченко // Электричество. – 2002. – № 6. – С. 2–5.
12. Будзко И. А. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник для вузов / И. А. Будзко, Т. Б. Лещинская, В. И. Сукманов. – М.: «Колос». – 2000. – 536 с.
13. Виссарионов В. И. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / В. И. Виссарионов, С. В. Белкина, Г. В. Дерюгина [и др.]; под ред. В.И. Виссарионова. – М.: 2004. – 448 с.
14. Власенко Е.А. Автономная энергетика сельского хозяйства: состояние и перспективы / Е.А. Власенко, Р.А. Сулейманов, А.А. Хамула // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 9–13.
15. Власов А. Г. Экономические аспекты использования возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии / А. Г. Власов, Е. В. Воробьев // Актуальные проблемы энергетики АПК. Матер. IV межд. НПК. – Саратов, СГАУ, 2013. – С. 49–52.
16. Воробьев Е. В. Устройство для обеспечения параллельной работы автономных инверторов солнечных фотоэлектрических станций / Е. В. Воробьев, С. А. Гордиенко // Материалы VIII Всероссийской молодежной школы с международным участием. – М.: Университетская книга, 2012. – С. 76–81.
17. Воробьев Е. В. Основные недостатки и перспективы солнечной энергетики / Е. В. Воробьев // Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК. Матер. межд. НПК. – Ставрополь, СГАУ, 2013. – С. 21–22.

18. Воробьев Е. В. Особенности проектирования автономных систем электроснабжения / Е. В. Воробьев // Технические и технологические системы. Матер. V Межд. НПК. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – С. 61–64.

19. Воробьев Е. В. Трансформаторы с вращающимся магнитным полем для статических преобразователей электроэнергии / Е. В. Воробьев, С. А. Гордиенко // Технические и технологические системы. Матер. V Межд. НПК. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – С. 58–61.

20. Воробьев Е. В. К вопросу оценки эффективности автономных систем электроснабжения / Е. В. Воробьев // Проблемы механизации и электрификации сельского хозяйства. Матер. Всерос. НПК. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – С. 229–231.

21. Воробьев Е. В. Ресурсы возобновляемых источников энергии в Краснодарском крае / Е. В. Воробьев // Научное обеспечение АПК. Матер. VIII Всерос. НПК. – Краснодар: КубГАУ. – 2014. – С. 458–460.

22. Воробьев Е. В. Солнечный инвертор на трансформаторе с вращающимся магнитным полем / Е. В. Воробьев, А. Э. Коломейцев, О. В. Григораш. Технологические инновации и научные открытия. Сб. статей VI Международной НПК. – Уфа : Изд. НИЦ Вестник мира, 2021. – С. 34–38.

23. Воробьев Е. В. Математическая модель солнечного инвертора на трансформаторе с вращающимся магнитным полем / Е. В. Воробьев, О. В. Григораш. Технологические инновации и научные открытия. Сб. статей VI Международной НПК. – Уфа : Изд. НИЦ Вестник мира, 2021. – С. 39–43.

24. Воронин С. М. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение / С. М. Воронин, С. В. Оськин, А. Н. Головкин. – Краснодар: КубГАУ, 2006. – 267 с.

25. Гайтов Б. Х. Разработка конструкций двухходовых 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.

26. 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.

27. Гайтов Б. Х. Ветро-солнечный генератор / Б. Х. Гайтов, Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич и др. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 4. – С.68–72.

28. Голицын М.В. Альтернативные энергоносители / М. В. Голицын. – М. Наука, 2004. – 159 с.

29. ГОСТ Р 51594-2000. Нетрадиционная энергетика. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. Термины и определения. Дата введения 2000-21-04.

30. ГОСТ Р 51597-2000. Нетрадиционная энергетика. МОДУЛИ СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. Типы и основные параметры. Дата введения 2000-21-04.

31. ГОСТ 53362-2009. СИСТЕМЫ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ. Требования и методы испытаний. Дата введения 2009-13-07.

32. ГОСТ Р 54100-2010. Нетрадиционные технологии. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ. Основные положения. Дата введения 2012-01-01.

33. Григораш О. В. К вопросу электромагнитной совместимости основных узлов систем автономного электроснабжения / О. В. Григораш, А. В. Давцко, С. В. Мелехов // Промышленная энергетика. – 2001. – № 2. – С. 44–47.

34. Григораш О. В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О. В. Григораш, Ю. И. Стрелков // Промышленная энергетика. – № 4. – 2001. – С. 37–40.

35. Григораш О. В. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии / О. В. Григораш, Ю. А. Кабанков // Электротехника. – 2002. – № 3. – С. 22–26.

36. Григораш О. В. Математический аппарат для оценки эффективности систем гарантированного электроснабжения / О. В. Григораш, Н. И. Богатырев, Н. Н. Курзин, Д. А. Казаков. – Краснодар: Б/И, 2002. – 285 с.

37. Григораш О. В. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии / О. В. Григораш, Ю. А. Кабанков // Электротехника, № 3, 2002. – С. 22–26.

38. 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.

39. Григораш О. В. Автономные инверторы: монография / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, Д. А. Нормов. – Краснодар: КубГАУ, 2006. – 164 с.

40. Григораш О. В. Автономные инверторы солнечных фотоэлектрических станций сельскохозяйственных потребителей / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, С. М. Пятикопов // Механизация и электрификация с.х. – 2006. – № 1 – С. 11–12.

41. Григораш О. В. Автономные инверторы модуляционного типа : монография / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, С. В. Божко, А. М. Передистый // КубГАУ. – Краснодар, 2008. – 187 с.

42. Григораш О. В. Возобновляемые источники энергии: термины, определения, достоинства и недостатки / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. Е. Усков, А. В. Квитко // Труды КубГАУ. – Краснодар, 2011, № 5. – С. 189–192.

43. Григораш О. В. Возобновляемые источники электроэнергии : монография / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов. – Краснодар : КубГАУ, 2012. – 272 с.

44. Григораш О. В. Автономные инверторы в устройствах бесперебойного электроснабжения / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. Е. Усков, Е. А. Власенко // Электротехника, 2012, № 6, С. 40–44.

45. Григораш О. В. Автономные источники электроэнергии : состояние и перспективы: монография / О. В. Григораш, С. В. Божко, А. Ю. Попов, В. В. Алмазов, А. В. Квитко. – Краснодар, 2012. – 174 с.

46. Григораш О. В. Перспективы возобновляемых источников энергии в Краснодарском крае / О. В. Григораш, В. П. Коваленко, Е. В. Воробьев // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2012. – № 6. – С. 123–127.

47. Григораш О. В. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О. В. Григораш, П. Г. Корзенков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (научный журнал КубГАУ). – Краснодар : КубГАУ, 2013. – № 93. – С. 364–376.

48. Григораш О. В. Достоинства и недостатки традиционных и возобновляемых источников энергии / О. В. Григораш, Е. В. Воробьев // Интеграция науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России. Матер. Межд. НПК т.2. – Волгоград: ВГАУ. – 2013. – С. 259–263.

49. Григораш О. В. Определение рабочих параметров фотоэлементов и экономической эффективности солнечных электростанций / О. В. Григораш, Т. А. Сторожук, А. Е. Усков, Е. В. Воробьев // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2013. – № 6. – С. 244–247.

50. Григораш О. В. Инверторы солнечных электростанций с улучшенными техническими характеристиками / 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. – С. 101–111.

51. Григораш О. В. Автономные инверторы для солнечных фотоэлектрических установок на трансформаторах с вращающимся магнитном поле / О. В. Григораш, Е. В. Воробьев, Я. А. Семенов // Образование и наука в современных условиях. V межд. НПК. – Чебоксары: ЦНС. – 2015. – № 4 (5) – С. 184–186.

52. Григораш О. В. Обстоятельства, влияющие на применение возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве / О. В. Григораш, В. В. Энговатова, Е. В. Воробьев // Энергия: экономика, техника, экология. – № 5. – 2015. – С. 16–19.

53. Григораш О. В. Новая элементная база возобновляемых источников: монография / О. В. Григораш, А. Ю. Попов, Е. В. Воробьев. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – 202 с.

54. Григораш О. В. О математическом моделировании энергетических систем / О. В. Григораш, Р. А. Амерханов, Е. В. Воробьев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 5. – С. 44–51.

55. Григораш О. В. Перспективы применения возобновляемых источников энергии в Краснодарском крае / О. В. Григораш, Е. В. Воробьев, П. Г. Корзенков // Механизация и электрификация с.х. – 2015. – № 10. – С. 21–23.

56. Григораш О. В. 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.

57. Григораш О. В. Преобразователи электрической энергии на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем для систем автономного электроснабжения / О. В. Григораш // Промышленная энергетика. – 1997. – № 7. – С. 21–25.

58. Григораш О. В. Развитие энергетики в мире и России / О. В. Григораш, Р. А. Амерханов, Е. В. Воробьев, А. Э. Коломейцев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 6 (122). – С. 22–27.

59. Григораш О. В. Системы автономного электроснабжения: монография / О. В. Григораш, Н. И. Богатырев, Н. Н. Курзин. – Краснодар, – 2001. – 333 с.

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

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

62. Григораш О. В. Общая характеристика, недостатки и перспективы солнечной энергетики / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. Г. Власов, Е. В. Воробьев // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2013. – № 4. – С. 283–286.

63. Григораш О.В. Трансформаторы статических преобразователей электроэнергии : монография / О. В. Григораш, С.В. Божко, Р.С. Шхалахов, Ю. Г. Пугачев. – Краснодар, – 2008. – 134 с.

64. Григораш О.В. Перспективы возобновляемых видов энергии: аргументы и факты / О. В. Григораш, А. Г. Власов, Е. В. Воробьев // Актуальные проблемы энергетики АПК. Матер. IV межд. НПК. – Саратов, СГАУ, 2013. – С. 76–78.

65. Григораш О.В. Статические преобразователи электроэнергии: монография / О. В. Григораш, О. В. Новокрещенов, А. А. Хамула, Р. С. Шхалахов. – Краснодар, КубГАУ, 2006. – 264 с.

66. Григораш О. В. Классификация и основные способы построения солнечных электростанций / О. В. Григораш, И. В. Евтушенко, М. А. Попучиева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2016. – № 124. С. 1453–1466.

67. Григораш О. В. Солнечные энергосистемы гарантированного электроснабжения / 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. С. 1467–1480.

68. Григораш О. В. Способы синтеза оптимальной структуры автономных систем на возобновляемых источниках / О. В. Григораш, П. Г. Корзенков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 100. С. 681–690.

69. Григораш О. В. Об эффективности и целесообразности использования возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае / В. В. Тропин, А. С. Оськина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 83. С. 506–517.

70. Григораш О. В. Ресурсы возобновляемых источников энергии Краснодарского края / О. В. Григораш, А. А. Хамула, А. В. Квитко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2013. – № 92. С. 630–641.

71. Григораш О. В. Стабилизация напряжения автономных инверторов солнечных электростанций / О. В. Григораш, М. А. Попучиева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2017. – № 130. С. 1019–1032.

72. Григораш О. В. Автономные гибридные / О. В. Григораш, А. А. Кривошей, В. В. Смык // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 124. – С. 1441–1452.

73. Григораш О. В. Инверторы солнечных электростанций с улучшенными техническими характеристиками / 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. – С. 372–382.

74. Григораш О. В. Солнечные энергосистемы гарантированного электроснабжения / 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. – С. 1467–1480.

75. Даус Ю. В. Ресурсный потенциал солнечной энергии для установок, использующих её в системе энергоснабжения потребителей г. Волжского / 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.

76. Даус Ю. В. Способ компоновки и пространственной ориентации фотоэлектрических панелей в солнечной электрической станции без слежения за солнцем / Ю. В. Даус, И. В. Юдаев, В. В. Харченкор. Патент на изобретение RU 2640795 С1, 12.01.2018. Заявка № 2016143958 от 08.11.2016.

77. Даус Ю. В. Об оценке валового потенциала солнечной энергии на сельских территориях / Ю. В. Даус, И. В. Юдаев // АгроЭкоИнженерия. – 2021. – № 2 (107). – С. 4–13.

78. Елистратов В. В. Возобновляемая энергетика / В. В. Елистратов // Изд. 2–е доп. – СПб. : Наука. – 2013. – С. 308.

79. Елистратов В. В. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / В. В. Елистратова, Н. В. Кобышевой, Г. И. Сидоренко // СПб: Наука. – 2010. – С. 235.

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

81. Ивакин В. Н. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике / В. Н. Ивакин, В. Д. Ковалев // Электриче-

ство. – 2001. – № 9. – С. 30–37.

82. Ильченко Я. А. Применение асинхронных генераторов для питания электротехнологических установок при производстве прудовой рыбы / Я. И. Ильченко. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 80 с.

83. Кашин Я. М. Ветро-солнечный генератор и его характеристики / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, И. Б. Самородов и др. // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2019. – № 6. – С. 201–214.

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

85. Кашин Я. М. Аксиальный трёхвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор / Я. М. Кашин, А. Я. Кашин, И. Б. Самородов. Патент на изобретение RU 2736200 С1, 12.11.2020. Заявка № 2020105349 от 04.02.2020.

86. Козюков Д. А. Резервирование нагрузок сельскохозяйственных потребителей с использованием аккумуляторных фотоэлектрических систем / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 3 (13). – С. 209–213.

87. Козюков Д. А. Анализ темпов и перспектив развития солнечной фотоэнергетики / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // Инновационная наука. – 2015. – № 8–2 (8). – С. 38–41.

88. Кошелев А. А. Перспективы использования возобновляемых природных ресурсов в энергетике России / А. А. Кошелев // Перспективы энергетики. – М.: Московский международный энергетический клуб. Т.6. – 2002. – № 1.

89. Лукутин Б. В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / Б. В. Лукутин, О. А. Суржикова, Е. Б. Шандарова. – М. : Энергоатомиздат. – 2008. – 231 с.

90. Лукутин Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии : учеб. пособие. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – 2008. – 187 с.

91. Лукутин Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии: учеб. пособие / Б. В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.

92. Муругов В. П. Зарубежные национальные программы использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии / В. П. Муругов // Энергетическое строительство. – 1993. – № 12. – С.24 – 29.

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

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

95. Никитенко Г. В. Автономная система электроснабжения овцеводческого хозяйства / Г. В. Никитенко, И. В. Деведеркин, Е. В. Коноплев, П. В. Коноплев // Сельский механизатор. – 2017. – № 1. – С.28–29.

96. Никитенко Г. В. Ветросолнечная система автономного электроснабжения / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, А. А. Лысаков и др. // Сельский механизатор. – 2018. – № 4. – С.28–29.

97. Никитенко Г. В. Ветросолнечная установка автономного электроснабжения / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, В. К. Салпагаров и др. Патент на изобретение RU 2680642 C1, 25.02.2019. Заявка № 2018103296 от 29.01.2018.

98. Никитенко Г. В. Мониторинг работы системы автономного электроснабжения / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, В. К. Салпагаров и др. // Сельский механизатор. – 2019. – № 7. – С. 40–41.

99. Никитенко Г. В. Автономное электроснабжение на основе солнечных панелей / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, В. К. Салпагаров, И. В. Данченко // Сельский механизатор. – 2019. – № 9. – С. 32–33.

100. Обозов А. Д. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие для вузов / А. Д. Обозов, Р. М. Ботпаев. – Бишкек : 2010. – 218 с.

101. Охоткин Г. П. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций / Г. П. Охоткин, А. В. Серебренников // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1. – С. 123–127.

102. Охоткин Г. П. Методика расчёта мощности солнечных электростанций / Г. П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 3. – С. 222–230.

103. Патент РФ № 2274942, С1 МПК H02M 7/537. Преобразователь постоянного напряжения в трехфазное переменное / О. В. Григоращ, В. Г. Руденко, А. В. Ракло, Б. О. Новокрещенов, В. А. Клещенов ; опубл. 20.04.2006. Бюл. № 11. – 3 с.

104. Патент РФ № 2412459. МПК G 05 F1/613, H 02 M7/493, H 02 M7/581. Устройство для обеспечения параллельной работы инверторов / О. В. Григоращ, Е. А. Власенко, А. Е. Усков [и др.]; опубл. 20.02.2011. Бюл. № 5.

105. Патент РФ № 2417471. МПК H 01 F30/14, H 02 M5/14. Однофазно-трёхфазный трансформатор с вращающимся магнитным полем / О. В. Григоращ, Е. А. Власенко, А. Е. Усков [и др.]; опубл. 27.04.2011. Бюл. № 12.

106. Положение о квалификации генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии. Утверждено Наблюдательным советом НП «Совет рынка», 27.02.2009.

107. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии / П. П. Безруких [и др.]; под ред. П. П. Безруких. – СПб. : Наука. – 2002. – 314 с.

108. Розанов Ю. К. 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.

109. Саплин Л.А. Энергосбережение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников: учеб. пособие / Л. А. Саплин, С. К. Шерьязов, О. С. Пташкина-Гирина, Ю. П. Ильин; под общ. ред. Л. А. Саплина. – Челябинск: ЧГАУ. – 2000. – 194 с.

110. Сибгатуллин А. Р. Оптимизация состава оборудования на основе возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения автономных потребителей небольшой мощности / А. Р. Сибгатуллин, В. В. Елистратов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2016. – № 23–24. – С. 51–67.

111. Сибикин Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. – М.: КНОРУС, 2010. – 232 с.

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

113. Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика и проблемы энергетической безопасности / Д. С. Стребков // М.: Научно-исследовательский институт энергетических сооружений. – 2008. – № 1–2. – С. 28–31.

114. Стребков Д. С. О Развитии возобновляемой энергетики / Д. С. Стребков, А. А. Лычагин // М.: Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК». – 2008. – № 3. – С. 35–38.

115. Стребков Д. С. Перспективные направления снижения стоимости солнечных энергетических установок / Д. С. Стребков и др. // *Теоретический и научно–практический журнал «Инновации в сельском хозяйстве»*. – 2015. – №4 (14). – С. 198–205.

116. Стребков Д. С. Роль солнечной энергии в энергетике будущего / Д. С. Стребков // М.: Научно-исследовательский институт энергетических сооружений. – 2005. – № 1–2. – С. 48–55.

117. Сулейманов Р.А. Синтез оптимальной структуры автономных систем на возобновляемых источниках энергии / Р.А. Сулейманов, Н.Н. Кирьян // Материалы VII Всероссийской школы с международным участием. М.: МИРОС. – 2010. – С. 317–321.

118. Сулейманов Р.А. Перспективы силовой электроники в автономных системах / Р.А. Сулейманов // Материалы II Международной НПК. Актуальные проблемы энергетики АПК. – Саратов: СГАУ. – 2011. – С. 277–278.

119. Сулейманов Р.А. К вопросу проектирования систем автономного электроснабжения / Р.А. Сулейманов // Материалы VI Российской НПК. Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК. – Ставрополь: СГАУ. – 2011. – С. 166–168.

120. Тимашевский Д. Н. Автономные инверторы: учеб. пособие. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 120 с.

121. Усков А. Е. Выбор оптимальной структуры системы автономного электроснабжения / А. Е. Усков // Механизация и электрификация с.-х. – 2007. – № 8. – С. 30–31.

122. Усков А. Е. Особенности обеспечения параллельной работы автономных инверторов / А. Е. Усков // Университет. Наука, идеи и решения. – Краснодар : КубГАУ, 2010. – № 2. – С. 181–183.

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

124. Усков А. Е. Автономный инвертор, повышающий эксплуатационные характеристики солнечных электростанций АПК : Дис ... канд. техн. наук / А. Е. Усков : КубГАУ. – Краснодар, 2014. – 113 с.

125. Флоренцев С. Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий / С. Н. Флоренцев // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 11–17.

126. Харченко В. В. Роль и место возобновляемых источников энергии в развитии глобальной энергетики / В. В. Харченко, Д. С. Стребков // М.: Научно-исследовательский институт энергетических сооружений. – 2011. – № 3–4. – С. 3–12.

127. Хорольский В. Я. Анализ и синтез систем автономного электропитания сельскохозяйственных объектов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. – Ростов н/Д : Терра, 2001. – 222 с.

128. Четошникова Л. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии : учеб. пособие / Л. М. Четошникова. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 69 с.

129. Четошникова Л. М. Оптимизация энергетических потоков в автономной системе электроснабжения с использованием нетрадиционных источников энергии / Л. М. Четошникова, Е. А. Морозова // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». – 2013. Т. 13. – № 2. – С. 41–44.

130. Шишкин Н. Д. Малые энергоэкономические комплексы с возобновляемыми источниками энергии / Н. Д. Шишкин. – М.: Готика. – 2000. – 236 с.

131. Энговатова В. В. Синтез модульных структур систем бесперебойного электроснабжения / В. В. Энговатова, Е. В. Воробьев // Актуальные вопросы современной науки. – 2015. – № 1. – С. 10–12.

132. 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.

133. Юдаев И. В. Управление пространственной ориентацией фотоэлектрического модуля для получения максимума выработки электрической

энергии в заданный момент времени / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, В. В. Харченко // Гелиотехника. – 2018. – № 5. – С. 9–17.

134. Юдаев И. В. Оценка графиков потребления электрической энергии объектов на сельских территориях как нагрузки солнечной электростанции / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, Д. А. Десятниченко // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – № S4. – С.10–17.

135. Юдаев И. В. Частные солнечные электрические станции Украины небольшой мощности: особенности функционирования и опыт эксплуатации / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, А. В. Жарков, В. Я. Жарков // Гелиотехника. – 2019. – № 6. – С. 560–571.

136. Юдаев И. В. Возобновляемые источники энергии: учебник / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, В. В. Гамага. – Санкт-Петербург. Сер. Высшее образование. – 2020. – 328 с.

137. Grigorash O. V. Uninterruptible power supply for renewable energy sources / O. V. Grigorash, A. Y. Popov, E. V. Vorobev, O. Y. Ivanovsky, A. S. Tuaeov // Series: Earth and Environmental Science 488 (2020) 012017.

138. Grigorash O. V. Modular aggregation functions performed by static inverters in autonomous power supply systems / O. V. Grigorash, A. Y. Popov, A. E. Uskov, E. A. Denisenko, A. V. Kvitko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness, TSIA 2019. – 2020.

139. Nikitenko G. Solar and wind stand-alone power system / G. V. Nikitenko, E. V. Konoplev, V. K. Salpagarov, A. Lysakov. В сборнике: Engineering for Rural Development. 2019. С. 1456–1462.

140. Nikitenko G. V. Improving the energy efficiency of using solar panels / G. V. Nikitenko, E. V. Konoplev, V. K. Salpagarov, I. V. Danchenko, G. V. Masyutina. В сборнике: IOP Conferense Series:Earth and Environmental Science. 2020. С. 012092.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Энерготехнологии-Сервис»
д.т.н.  В.А. Бутузов
«14»  2021 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 Воробьев Е.В., составили настоящий акт о том, что кафедрой Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии переданы в ООО «Энерготехнологии-Сервис» разработанные соискателем Воробьевым Е.В. под руководством профессора Григораш О.В. математический аппарат для оценки эффективности автономных инверторов и солнечных фотоэнергетических установок, включающий критерии оценки: энергетические показатели (КПД, активная, реактивная и полная мощность), показатели качества напряжения (коэффициент гармоник) и массогабаритные показатели автономных инверторов; экономические показатели солнечных фотоэнергетических установок, включая затраты на НИОКР, капитальные и эксплуатационные затраты.

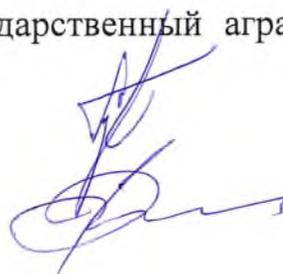
Математический аппарат используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» для оценки показателей эффективности автономных инверторов и солнечных фотоэлектрических станций малой мощности.

ООО «Энерготехнологии-Сервис»
главный инженер



В.В. Бутузов

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



О.В. Григораш
Е.В. Воробьев



П О Д Т В Е Р Ж Д А Ю

первый проректор КубГАУ

д.т.н. профессор

С.М. Резниченко

2021 г.

А К Т

о внедрении в учебный процесс результатов кандидатской диссертационной работы соискателя Воробьева Евгения Васильевича ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» на факультете энергетике

Мы, ниже подписавшиеся комиссия в составе:

председателя – декана факультета энергетике 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 «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии», д.т.н., профессора Амерханова Р.А. настоящим актом подтверждаем, что результаты кандидатской диссертации «Параметры и режимы работы автономного инвертора солнечной фотоэнергетической установки малых фермерских и личных подсобных хозяйств», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебном процессе на факультете энергетике.

Комиссия установила, что материалы диссертационной работы соискателя Воробьева Е.В. 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 Воробьева Е.В., 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

 Р.А. Амерханов