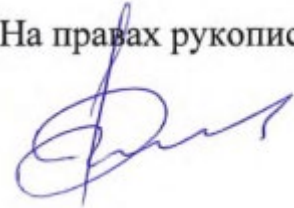


На правах рукописи



**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

**Автореферат**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Краснодар**

**2022**

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

Научный руководитель: **Григораш Олег Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Юдаев Игорь Викторович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский ГАУ,  
главный научный сотрудник кафедры  
«Энергообеспечение предприятий и электротехнологии»

**Коноплев Евгений Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ, доцент  
кафедры «Применения электроэнергии  
в сельском хозяйстве»

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

Защита диссертации состоится 28 апреля 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13, КубГАУ, корпус факультета механизации, ауд. № 345.

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

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор  
Фролов Владимир Юрьевич



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В настоящее время для электро-снабжения автономных сельскохозяйственных потребителей малых фермерских и личных подсобных хозяйств применяются бензо- или дизельные станции, имеющие низкие эксплуатационно-технические характеристики.

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.

Важным функциональным элементом солнечных фотоэнергетических установок (СФЭУ) является 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, технические и функциональные характеристики.

Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР Кубанского ГАУ на 2016–2020 гг. ГР № АААА-А16-116021110059-9, тема 27 «Оптимизация ресурсосберегающего электрооборудования, электро-технологий и систем автономного электро- и теплоснабжения для отраслей АПК с использованием возобновляемых источников энергии» и на 2021–2025 гг. ГР № 121031700099-1, тема 32 «Обоснование и создание энергосберегающих адаптированных систем и технологий сельскохозяйственного назначения».

**Степень разработанности темы.** Научные проблемы разработки энергоэффективных солнечных 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., Коноплев Е. В., Лукитин Б. В., Никитенко Г. В., Саплин Л. А., Сибикин Ю. Д., Стребков Д. С., Четошников Л. М., Юдаев И. В. и многие другие авторы. 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.

**Научная проблема.** Сегодня всё больше находят применение возобновляемые источники энергии в различных отраслях. Однако их широкому применению для электроснабжения потребителей электроэнергии малых фермерских и личных подсобных хозяйств (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 экс-

плуатационно-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 статистической 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-трёхфазного трансформатора 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, определяющиеся 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 позволит повысить эффективность разработки системы 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 ви-

дов 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 работе, созданной 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 модулирования.

***Реализация результатов исследований.*** Материалы по исследованию компьютерной модели и технико-экономическому обоснованию постановки на серийное производство солнечных фотоэнергетических установок малой мощности переданы в ООО «Солнечный центр» и ООО «Энерготехнологии-Сервис». Результаты научных исследований используются в учебном процессе в КубГАУ по дисциплине «Электрооборудование возобновляемой энергетики».

***Апробация работы.*** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на двух всероссийских и шести международных научно-практических конференциях, в том числе, на VIII Всероссийской молодёжной школы 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 автономного инвертора на трансформаторе с вращающимся магнитным полем, разработке экспериментальной установки и исследовании однофазно-трёхфазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 24 научные работы, включая одну статью, размещенную в БД Скопус, 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.

**Во введении** раскрывается актуальность исследований. Сформулированы цель и задачи исследований, объект и предмет исследований, научная новизна, практическая значимость и вопросы, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Состояние вопроса и задачи исследований» показано, что 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.

Проведён анализ характеристик потребителей электрической энергии, применяемых в МФХ и ЛПХ и существующих серийно вы-



пускаемых СФЭУ. Установлено, что мощность СФЭУ должна быть в пределах 3–5 кВт, напряжение 220/380 В, частота тока как промышленной частоты, так и пониженной и повышенной.

Проведён анализ особенностей работы и основных ЭТХ известных технических решений АИ,

Раскрыта научная проблема, рабочая гипотеза, цель и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** «Критерии оценки эффективности и структурно-схемные решения автономных инверторов» 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; массогабаритные показатели, включающие показатели расчета силовой электронной схемы, трансформатора, входного и выходного фильтров; показатели качества напряжения, оценивающиеся по величине коэффициента гармоник; показатели активной, реактивной и полной мощности.

Статические потери на полупроводниковых приборах силовой схемы инвертора

$$\Delta P_C = m U_{\text{ПР}} I_d, \quad (1)$$

где  $m$  – число приборов, включенных одновременно;

$U_{\text{ПР}}$  – прямое падение напряжения во включенном состоянии;

$I_d$  – ток, протекающий через прибор.

Динамические потери на полупроводниковых приборах

$$\Delta P_D = \frac{\pi}{2} m U_{\text{И}} I_d f t_{\text{вкл}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{И}}$  – напряжение на выходе инвертора;  $f$  – частота тока;

$t_{\text{вкл}}$  – время включения полупроводникового прибора.

КПД автономного инвертора

$$\eta_{\text{И}} = \frac{\Delta P_C}{\Delta P_C + P_{\text{И}}}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_C$  – суммарные потери, включающие динамические и статические потери, а также потери в трансформаторе, фильтрах и системе управления;

$P_{\text{И}}$  – мощность инвертора.

Полная мощность энергии, выделяемая на нагрузке, определяется по формуле:

$$S = \frac{2\sqrt{2}\gamma U^2}{\pi R} \sqrt{\sum_n (1 + n^2 \operatorname{tg}^2 \varphi)^{-1} \left[ \frac{1}{n} \sin c \frac{1}{\sin b} \right]^2}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – скважность импульсов ШИМ;

$U$  – напряжение источника постоянного тока;

$R$  – активное сопротивление нагрузки;

$n$  – номер гармоники;

$\varphi$  – угол сдвига фаз;

$c = \frac{\pi\gamma}{2i}$  и  $b = \frac{\pi}{2i}$  – коэффициенты, значение которых зависит от  $i$  –

числа импульсов ШИМ.

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  $K_G$ :

$$K_G = \sqrt{\frac{\pi^2 \gamma \sin \frac{\pi}{2i}}{16 \sin^2 \frac{\pi\gamma}{2i}}} - 1. \quad (5)$$

Разработаны функциональные схемы АИ, выполненные на однофазной мостовой схеме и однофазно-трёхфазном ТВМП. Раскрыты преимущества и недостатки схем АИ при использовании в качестве опорного сигнала системы управления сигнал треугольной или пилообразной формы.

Получены зависимости КПД и удельной массы АИ на ТВМП при входных напряжениях источника напряжения постоянного тока 24 и 48 В (рисунок 1).

Разработана принципиальная электрическая схема автономного инвертора, выполненная на базе полевых транзисторов и однофазно-трёхфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем, с использованием микропроцессорной техники (рисунок 2), и алгоритм работы системы управления по преобразованию и стабилизации напряжения, а также с возможностью изменять частоту тока по заданному закону регулирования.

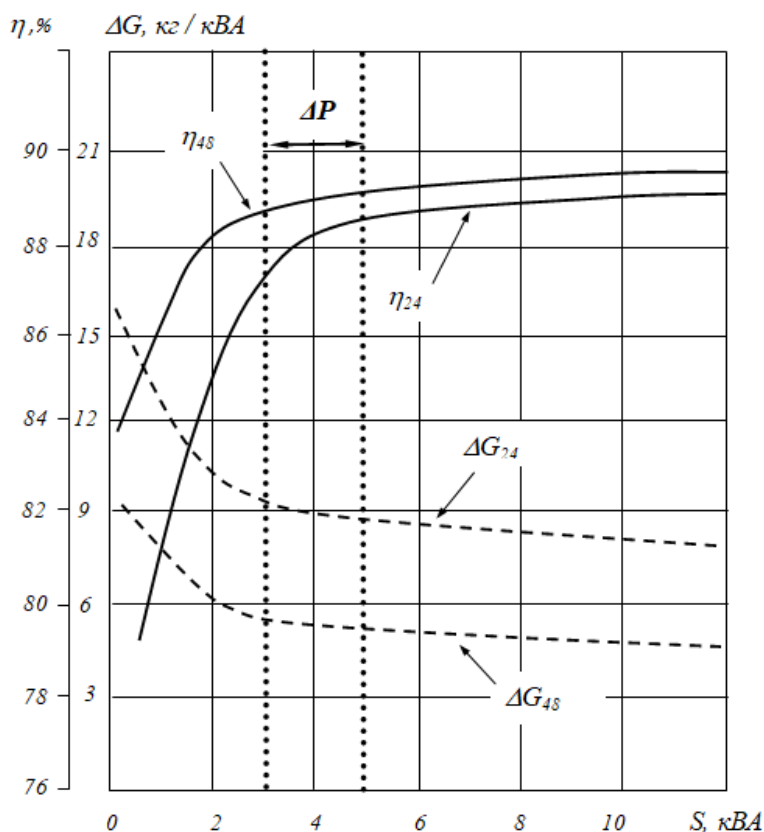


Рисунок 1 – Зависимости КПД и удельной массы автономных инверторов от мощности при входном напряжении 24 и 48 В

**В третьей главе** «Математическое моделирование автономного инвертора на трансформаторе с вращающимся магнитным полем» 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 характеристик для различных режимов работы АИ, характеризующие амплитудные значения токов и напряжений, переходные процессы и спектральный состав выходного напряжения электронной схемы преобразователя.

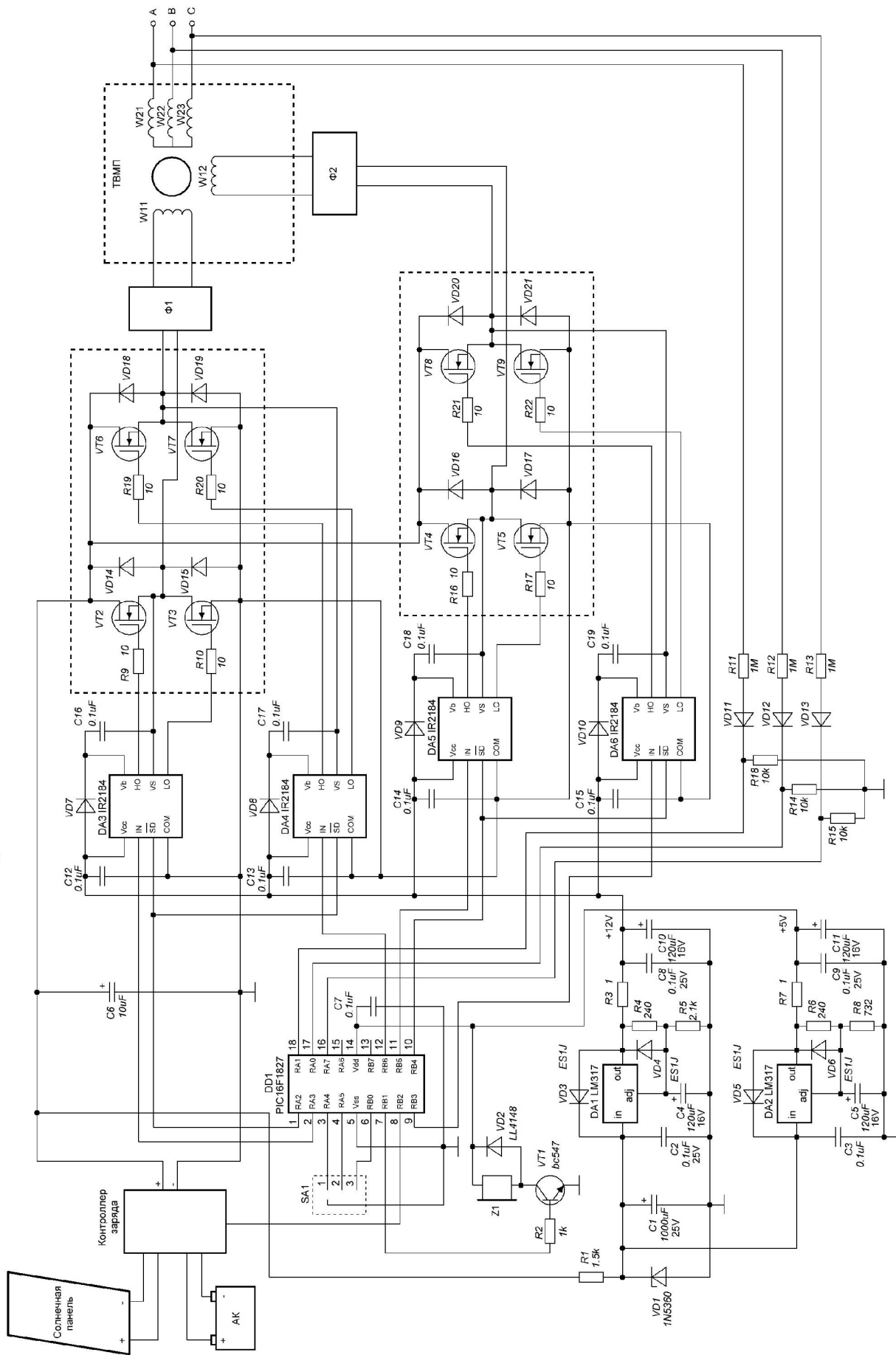
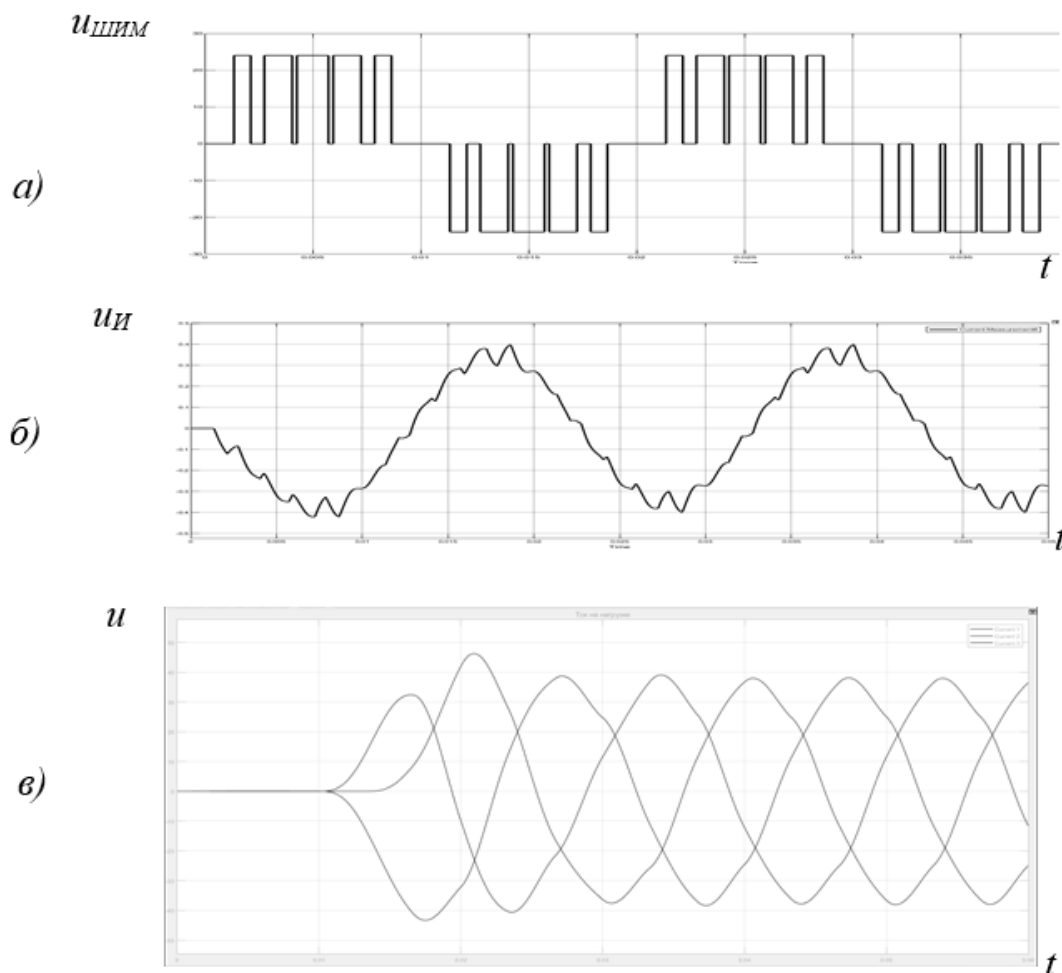


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП

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

В процессе моделирования были получены семейства динамических характеристик для различных режимов работы АИ (рисунок 3).



напряжение ШИМ (а); напряжение на выходе однофазной схемы инвертора (б); напряжение на выходе ТВМП (в)

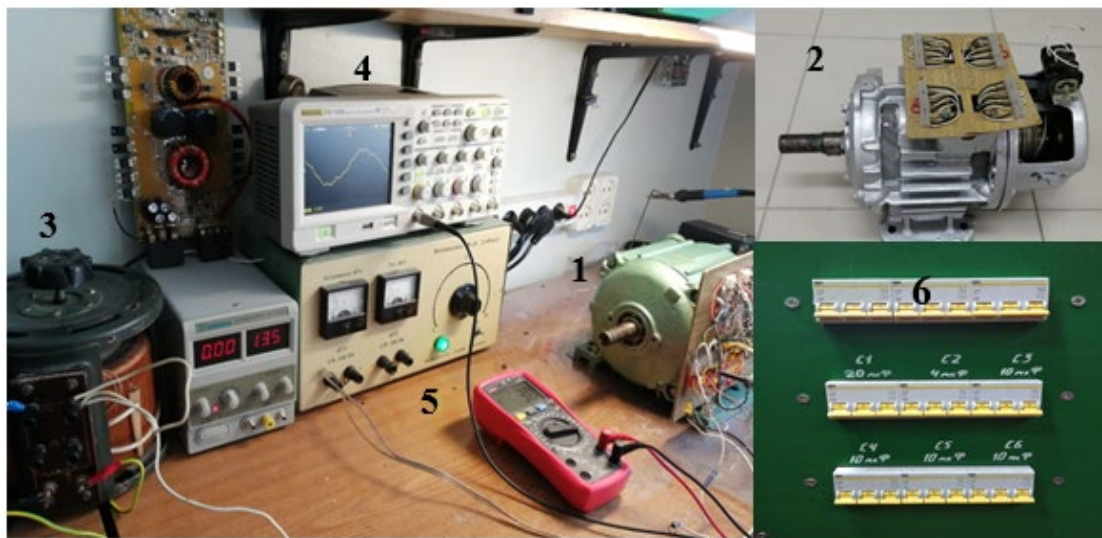
Рисунок 3 – Динамические характеристики

Результаты компьютерного моделирования показали, что при проектировании АИ на однофазно-трёхфазном ТВМП для улучшения их ЭТХ необходимо учитывать ряд факторов: требования потребителей к качеству электроэнергии; диапазон регулирования напряжения; количество модулирующих импульсов ШИМ; характер нагрузки; длительность переходных процессов.

**В четвертой главе** «Экспериментальные исследования и расчет технико-экономических показателей солнечных фотоэнергетических

систем» для подтверждения результатов теоретических исследований разработан испытательный стенд по исследованию работы однофазно-трёхфазного ТВМП (рисунок 4), выполненного на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и асинхронного двигателя с фазным ротором.

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 и фазным ротором.



1 и 2 – асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором соответственно; 3 – лабораторный автотрансформатор, выполняющий функцию инвертора – источника напряжения однофазного переменного тока; 4 – осциллограф; 5 – блок измерительных приборов; 6 – блок фазосдвигающих конденсаторов 6, активно-индуктивная нагрузка

Рисунок 4 – Внешний вид экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований разработана развёрнутая электрическая схема первичных и вторичных обмоток ТВМП. При этом первичные обмотки укладывались в пазах ротора асинхронной машины с фазным ротором, а вторичные в её статоре, первичные и вторичные обмотки асинхронной машины с короткозамкнутым ротором размещались в пазах статора.

Методика проведения экспериментальных исследований включала проведение следующих испытаний: на первичные обмотки ТВМП

подавалось напряжение переменного тока от 24 до 48 В, измерялись напряжение и ток на входе и выходе ТВМП, а также длительность переходных процессов при подключении нагрузки, и на всех этапах измерения напряжения фиксировалась его форма с помощью осциллографа.

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.

Как известно, одним из критериев, характеризующих достоверность исследований, является совпадение основных характеристик, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований. Оценка этого критерия проводилась по усредненным значениям рассогласования электрических параметров, полученных при компьютерном моделировании с электрическими параметрами, полученными при экспериментальных исследованиях. Задача решалась с помощью метода статистической оценки точности результатов исследований, проводимых на физической модели. При этом доверительный интервал определялся на основании критерия Стьюдента.

Сопоставление результатов компьютерного моделирования и исследований на физической модели дало хорошее совпадение доверительных интервалов (расхождение не более  $\pm 5,5\%$ ) и средних значений (расхождение от  $-4,05$  до  $+5,5\%$ ).

Поскольку в Краснодарском крае несколько тысяч МФХ и ЛПХ, для которых требуется электроэнергия небольшой мощности, как правило, 3 кВт, то проводился расчет технико-экономических показателей СФЭУ такой мощности для применения их в 100 хозяйствах, что послужит ориентиром для дальнейших разработок и внедрения мобильных СФЭУ в Краснодарском крае. Технико-экономическое обоснование постановки на серийное производство СФЭУ мощностью 3 кВт показало, что срок окупаемости 100 установок не превысит 6 лет.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Итоги выполненного исследования**

1. Широкие перспективы раскрываются перед СФЭУ, осуществляющими электроснабжение МФХ и ЛПХ, занимающихся производ-

ством мёда, мяса, шерсти, рыбы, а также обеспечивающих 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  $\lambda$  для обеспечения небольших значений амплитуды высших гармоник должна изменяться в пределах от 0,8 до 1. Для расширения диапазона регулирования напряжения при значениях скважности импульсов  $\lambda$  от 0,6 до 1 выходной фильтр должен быть двухзвенным и настроен для подавления 3 и 5 гармоник.

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 на 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 микропро-



цессорной 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 увеличения количества модулирующих импульсов ШИМ выходного напряжения;

- 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 статистической оценки точности результатов исследований, проводимых на физической мо-

дели. 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. Проведён 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, который будет иметь выше 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.

### **Основные положения диссертации опубликованы**

– в изданиях, размещенных в БД Скопус:

1. Vorobev, E.V. Uninterruptible power supply for renewable energy sources // O. V. Grigorash, A.Y. Popov, E.V. Vorobev, O.Y. Ivanovsky,

A.S. Tuayev // Series: Earth and Environmental Science 488 (2020) 012017.

– в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

2. Воробьев, Е. 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.

3. Воробьев, Е. 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.

4. Воробьев, Е. 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.

5. Воробьев, Е. 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.

6. Воробьев, Е. В. Потенциал возобновляемых источников энергии на селе / О. В. Григораш, В. Н. Плешаков, Е. В. Воробьев, К. В. Пигарев // Механизация и электрификация с.х. – 2018. – № 7–8. – С. 32–33.

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

8. Воробьев, Е. 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.

– в монографиях:

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

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

– в других изданиях:

11. Воробьев, Е. В. 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.
12. Воробьев, Е. В. Устройство для обеспечения параллельной работы автономных инверторов солнечных фотоэлектрических станций / Е. В. Воробьев, С. А. Гордиенко. Материалы VIII Всероссийской молодёжной школы с международным участием. – М.: Университетская книга, 2012. – С. 76–81.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.

20. Воробьев, Е. 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.

21. Воробьев, Е. 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.

22. Воробьев, Е. 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.

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

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

*Автореферат*

**Воробьев Евгений Васильевич**

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

---

Подписано в печать «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бум. тип. № 1. Усл. печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ № 100.

ИП Тасалов А.В. Переплетная мастерская  
350004, г. Краснодар, ул. Северная, 81