

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВ Павел Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ
НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ**

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент
Л.Ю. Юферев

Севастополь – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	
12	
1.1 Современное состояние и направления развития фотоэлектрических энергоустановок	12
1.2 Анализ основных технических средств повышения энергетической эффективности промышленных фотоэлектрических установок	17
1.3 Анализ существующих способов отбора электрической энергии от фотоэлектрических установок, работающих в условиях неравномерной освещенности.....	25
Выводы по разделу:	33
РАЗДЕЛ 2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ.....	
35	
2.1 Математическая модель солнечного элемента.....	35
2.2 Теоретический анализ физических процессов в СФУ, работающих в условиях равномерного и неравномерного освещения при последовательной коммутации СЭ	42
2.3 Теоретический анализ физических процессов в СФУ, работающих в условиях равномерного и неравномерного освещения при параллельной и смешанной коммутации СЭ.....	53
Выводы по разделу:	72
РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ОТБОРА МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАССИВОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ.....	
74	
3.1 Способ повышения эффективности отбора электрической энергии от массивов фотоэлектрических модулей	75
3.2 Разработка функциональной схемы УСФМ	80
3.3 Разработка принципиальной схемы УСФМ	83
3.3.1 Разработка повышающего DC-DC преобразователя.....	84

3.3.2	Разработка инверторного преобразователя с гальванической развязкой.....	92
3.3.3	Разработка электронно-вычислительного устройства	101
3.3.4	Разработка понижающего DC-DC преобразователя.....	104
3.3.5	Разработка вспомогательных элементов	109
3.3.6	Построение принципиальной схемы УСФМ.....	114
3.3.7	Алгоритм работы ЭВУ.....	116
3.4	Разработка макетного и полупромышленного образца УСФМ	116
	Выводы по разделу:	120
РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СФУ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ.....		122
4.1	Средства измерения и контроля.....	123
4.2	Методика проведения эксперимента.....	129
4.2.1	Определение интенсивности солнечного излучения	132
4.2.2	Снятие характеристик, определение выходной мощности	133
4.2.3	Оценка погрешностей измерений экспериментальных данных	134
4.3	Результаты экспериментального исследования.....	136
4.4	Расчет экономической эффективности УСФМ	148
	Выводы по разделу:	155
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ		157
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....		159
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		160
Приложения.....		16081

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время в мире все большее распространение получают энергоустановки, работающие от возобновляемых источников энергии, среди которых, одними из наиболее перспективных представляются установки, использующие энергию солнечного излучения. Преимуществами этого источника энергии являются экологичность, что позволяет использовать его практически в любых масштабах, не принося ущерба окружающей среде, а также «доступность почти в каждой точке нашей планеты, различаясь по плотности излучения не более чем в два раза» [70]. В Российской Федерации достаточно много районов, где среднегодовой приход солнечной энергии составляет 4-5 кВт·ч на квадратный метр в сутки, этот показатель является довольно высоким и соизмеримым с показателями в странах-лидерах по внедрению солнечных энергетических систем. Всё это говорит о целесообразности развития солнечной энергетики в нашей стране. К тому же модульная конструкция фотоэлектрических установок позволяет их проектировать практически на любую мощность, что делает эти установки универсальным и надежным решением, находящим широкое применение как в промышленном производстве электроэнергии, так и в небольших системах энергообеспечения [9,46].

Нередко при проектировании солнечных установок используются варианты конструкций размещения фотоэлектрических панелей, предполагающие их работу в условиях неравномерного освещения, или частичного затенения на протяжении достаточно длительного промежутка времени [46,48]. Использование таких схем связано с ограниченностью площади размещения проектируемой установки, стремлением к экономии места, или свойствами рельефа. При этом зачастую не учитываются некоторые особенности работы фотоэлектрических модулей, что приводит к значительному снижению их и без того невысокой эффективности [43]. Также неравномерное освещение фотоэлектрических модулей может возникнуть по причине факторов, не зависящих от проектирования. Примерами таких

случаев может быть отброшенная тень от рядом расположенной постройки, деревьев, облаков и др.

Для достижения требуемой электрической мощности, в солнечных энергоустановках применяют последовательную, параллельную и смешанную коммутацию солнечных элементов (СЭ). В каждом варианте коммутации, снижение эффективности от неравномерного освещения происходит по разным причинам, что требует различных технических, экономически обоснованных решений для увеличения энерговыработки установок при работе в таких условиях. Данная диссертация посвящена этой актуальной проблеме, требующей скорейшего решения ввиду значительного увеличения количества солнечных электростанций в Российской Федерации и мире в последние годы [70,9], около 70 % из которых, имеют конструкцию с многорядным расположением солнечных панелей с присущей ей проблемой затенения нижних рядов при невысоких значениях высоты солнца [44]. Также необходимо отметить, что проблема частичного затенения существует на всех солнечных энергоустановках.

Тематика работы отвечает «Энергетической стратегии России на период до 2035 г.» и направлена на решение задач, следующих из Распоряжений Правительства РФ №1-р от 08.01.2009 «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.», №151-р от 02.02.2015 «Стратегии устойчивого развития сельских территорий РФ на период до 2030 г.», №1830-р «Об утверждении плана мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации» от 01.12.2009, Федерального закона №261 – ФЗ от 23.11.2009 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» и Указов Президента РФ №889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» от 04.06.2008.

Степень разработанности. В настоящее время существует ряд способов, позволяющих частично нивелировать проблему неравномерного освещения фотоэлектрических установок, однако их использования зачастую не позволяет значительно повысить их энергоэффективность, ввиду того, что решение данной проблемы требует комплексного подхода. Так, например, использование только лишь шунтирующих диодов приводит к отключению (шунтированию) затененных фотоэлектрических панелей (модулей), что при смешанной коммутации значительно снизит энерговыработку группы, включающую эти панели, вследствие её рассогласованности по напряжению в точках максимальной мощности с другими параллельно-соединенными группами. Аналогичный эффект будет и при использовании индивидуальных согласующих преобразователей. Решению проблемы согласования по напряжению параллельно соединенных массивов модулей уделено отдельное внимание в настоящей диссертации, так как в данное время на рынке не представлено экономически оправданных технических решений способных решить данную задачу в наземных солнечных станциях, свидетельством чего является их применение только в специальных космических установках [1,77].

Цель работы: повысить энергетическую эффективность солнечных фотоэлектрических установок, с различными вариантами коммутации фотоэлектрических модулей, за счет отбора максимальной мощности в условиях неравномерного освещения.

Задачи исследования:

1. Провести теоретический анализ работы солнечных фотоэлектрических установок (СФУ) с различными вариантами коммутации фотоэлектрических модулей и применением устройств, реализующих способы повышения эффективности в условиях неравномерного освещения с разработкой математических моделей.
2. Разработать эффективный способ отбора электрической энергии от параллельно соединенных массивов фотоэлектрических модулей,

работающих в условиях различной освещенности, и изготовить лабораторный макет устройства согласования массивов фотоэлектрических модулей (УСФМ), реализующий разработанный способ.

3. Разработать методику исследования работы СФУ в условиях неравномерного освещения. Осуществить подбор необходимого оборудования, приспособлений и контрольно-измерительной аппаратуры. Разработать и изготовить информационно-измерительный комплекс для отображения, регистрации и хранения измерительной информации.
4. Провести экспериментальное исследование работы СФУ с различными вариантами коммутации солнечных элементов и конструкций расположения фотоэлектрических модулей, а также с использованием устройств, реализующих способы повышения эффективности в условиях неравномерной освещенности: индивидуальными согласующими преобразователями и устройствами согласования массивов фотоэлектрических модулей.
5. Оценить экономическую эффективность внедрения устройств согласования массивов фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях.

Объект исследования: солнечные фотоэлектрические установки и электростанции, работающие в условиях неравномерного освещения.

Предмет исследования: взаимосвязь энергетических и электрических характеристик солнечных фотоэлектрических установок и электростанций с различными условиями их освещенности при различных вариантах коммутации, конструкции расположения фотоэлектрических панелей и способах отбора электрической энергии.

Научная новизна:

1. Получила развитие математическая модель СФУ, работающих в условиях неравномерной освещенности, позволяющая производить расчет её энергетических характеристик и параметров при различных вариантах коммутации, конструкции, расположения фотоэлектрических модулей и способах отбора электрической энергии.
2. Впервые разработан эффективный способ отбора электрической энергии от параллельно соединенных массивов фотоэлектрических модулей, позволяющий увеличить энерговыработку СФУ, работающих в условиях неравномерной освещенности.
3. Усовершенствована методика проведения экспериментального исследования характеристик СФУ позволяющая получать энергетические характеристики и параметры СФУ при различных вариантах коммутации, конструкции расположения фотоэлектрических модулей, различной освещенности, способах отбора электрической энергии с использованием разработанного информационно-измерительного комплекса.
4. Впервые получены экспериментальные данные от применения устройств согласования массивов фотоэлектрических модулей для повышения эффективности солнечных энергоустановок со смешанной коммутацией.

Практическая значимость работы и реализация её результатов:

Материалы диссертационной работы могут быть использованы при проектировании солнечных фотоэлектрических электростанций и установок, предполагающих работу в условиях неравномерного освещения, а также для внедрения на действующих солнечных энергоустановках, работающих в таких условиях, для повышения их энергетической эффективности.

Разработанные математические модели позволяют осуществить теоретический анализ энергетических и электрических характеристик СФУ с различными вариантами коммутации солнечных элементов и способами

отбора электрической энергии от них при различных условиях освещенности, что позволяет выбирать наиболее рациональное техническое решение из соображения получения максимальной энергетической эффективности для конкретных условий.

Внедрение на действующих СФУ разработанных устройств согласования массивов фотоэлектрических модулей, реализующих способ отбора электрической энергии от параллельно соединенных массивов фотоэлектрических модулей с различной освещенностью, позволяет значительно увеличить их энерговыработку, особенно при невысоких значениях высоты солнца (в зимнее время), при финансовых затратах, не превышающих 1,2 % стоимости установки.

Разработанный и изготовленный информационно-измерительный комплекс позволяет, как в полевых, так и лабораторных условиях без использования дополнительного оборудования производить с высокой точностью в автоматическом режиме измерения и регистрацию различных электрических и энергетических характеристик ФЭУ, а также характеристик условий окружающей среды с их отображением в графическом и числовом виде.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», на действующих солнечных установках ООО «С. Энерджи-Севастополь» и ООО «Эко-Энерджи» г. Самара, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Методы исследования: теоретической и методологической основой при выполнении диссертационной работы являются труды и разработки отечественных и зарубежных ученых в области исследования работы СФУ.

В работе использовались аналитические и экспериментальные методы исследования, включающие математическое моделирование с использованием системы компьютерной алгебры Mathcad Prime 3, программирования, метод

«светового эквивалента», метод математической обработки результатов эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный способ и устройство отбора электрической энергии от параллельно соединенных массивов фотоэлектрических модулей позволяет повысить их энерговыработку до 42,3%, при частичном затенении, за счет согласования по напряжению затененных и незатененных массивов.
2. Для согласования массивов фотоэлектрических модулей по напряжению не требуется преобразование всей вырабатываемой ими электрической энергии, в отличие от зарубежных аналогов, а лишь её небольшой части, определяемой уровнем рассогласованности.
3. Разработанные математические модели позволяют производить оценку энергетической эффективности и потерь электроэнергии СФУ, работающих в условиях неравномерного освещения, при различных вариантах коммутации, конструкции расположения фотоэлектрических модулей и способах отбора электрической энергии.
4. Разработанный портативный информационно-измерительный комплекс позволяет в реальном времени производить исследования энергетических характеристик СФУ, их диагностику и измерять параметры окружающей среды с относительной погрешностью, не превышающей 3,4%.

Достоверность научных результатов подтверждается соответствием аналитических данных, а также высокой повторяемостью экспериментальных данных, полученных в лаборатории возобновляемых источников энергии кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета и действующих

солнечных электростанциях в г. Севастополе ООО «С. Энерджи-Севастополь» и в г. Алуште ООО «НПФ «Энергоспецпроект».

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и одобрены на: Международном молодежном конгрессе «Энергетическая безопасность» (г. Курск 24 декабря 2015 г.), II Всероссийской конференции «Энергоэффективность. Наука и образование» (г. Севастополь, 28-29 октября 2015г.), 7-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Инновации в сельском хозяйстве» (г. Москва, 13-14 декабря 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017» (г. Севастополь 11 по 15 сентября 2017 г.), Международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы – 2017» (г. Севастополь, 19-20 октября 2017 г.), семинаре «Экология и альтернативная энергетика» (18 октября 2017 г.), Ялтинской энергетической конференции (9-10 ноября 2017 г.), Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные машинные технологии и техника в сельском хозяйстве» (12-13 декабря 2017 г.), XIII Международном салоне изобретений и новых технологий «Новое время» (28-30 сентября 2017г. получен кубок «За лучшее молодежное изобретение» и золотая медаль), конкурсе Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «УМНИК» (получен грант №9991ГУ/2015).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 17 печатных работ, в том числе 6 работ в изданиях, рекомендуемых ВАК, получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х разделов, общих выводов, библиографического списка и восьми приложений. Содержит 186 страниц машинописного текста, 88 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 137 наименований.

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

1.1 Современное состояние и направления развития фотоэлектрических энергоустановок

Мировое развитие энергетических установок, работающих от ВИЭ, показывает, что одной из наиболее динамично развивающихся отраслей этого направления энергетики является солнечная фотоэнергетика. В течение последних десяти лет в мире ежегодный прирост выработки электроэнергии за счет этого источника достигает 20-30% (рисунок 1) с ожидаемым выходом к 2040 году на уровень 6,2% мирового производства электроэнергии [108,119,122,129]. Лидирующую позицию как по вводу новых мощностей солнечной энергетики, так и по установленной мощности занимает Китай. Ожидается, что установленная мощность солнечных электростанций в этой стране составит 110 ГВт к 2020 г. Интенсивный рост также ожидается в странах АТР, включая Индию, США и некоторых европейских странах, таких как Соединенное Королевство и Германия.

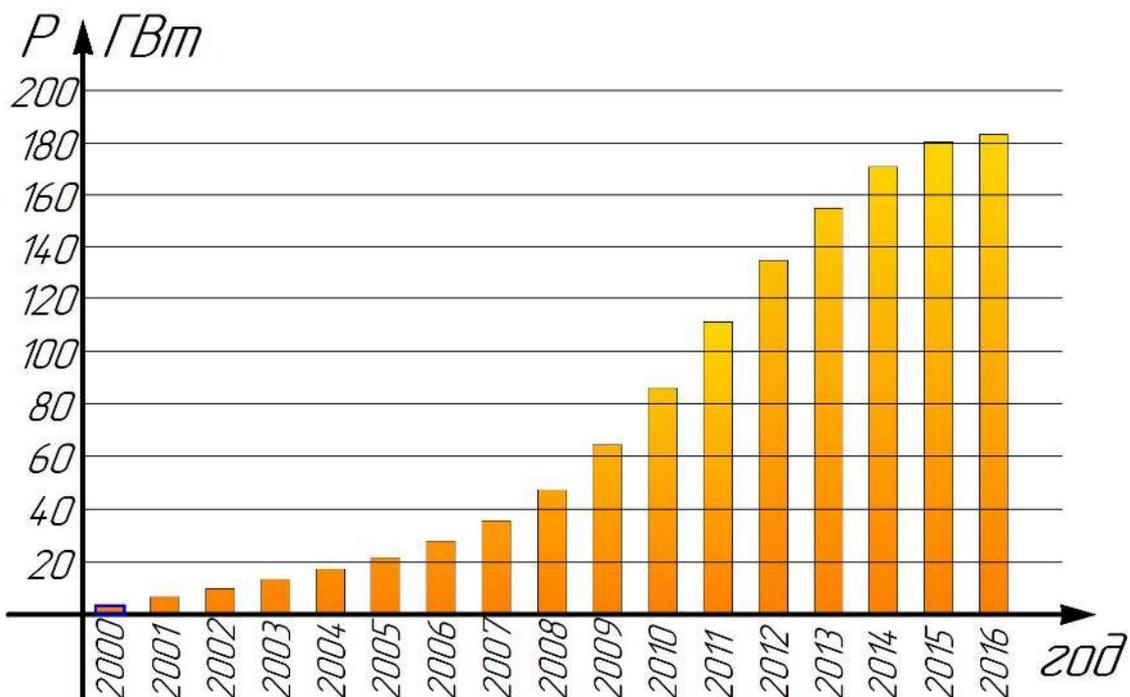


Рисунок 1 – Установленная мощность фотоэлектрических станций в мире

Поддержку данной отрасли оказывают как частные инвесторы, так и государства. В настоящее время, разработано большое количество новых технологий, направленных на повышение энергетической эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, приближая эту ветвь энергетики к рентабельности. Данные МЭА показывают, что нормированная стоимость электрической энергии (LCOE), генерируемая фотоэлектрическими станциями, с 2010 по 2015 г снизилась на 65%, почти «вплотную приблизившись» к аналогичному показателю ископаемых видов топлива [70,127]. Подтверждением этих данных являются результаты проведенного исследования Bloomberg new energy finance за II квартал 2015 г., показывающие, что в некоторых странах солнечная энергетика полностью конкурентоспособна с газовой и угольной. К примеру, в Китае показатель LCOE солнечной энергетики составил 109 долл., в то время как «газовое электричество» стоит 113 долл. за 1 МВт·ч. В Германии LCOE солнечной энергетики составил 95-115 долл., газовый -118 долл., а угольный - 106 долл. за 1 МВт·ч [108,136,137].

Также следует отметить, что существующие расчеты экономической эффективности солнечных установок и установок, работающих на традиционном топливе (нефть, газ, ядерное топливо и т.д.) представляются достаточно неточными. Такие выводы связаны с тем, что в них не учитывается ряд скрытых косвенных затрат, связанных с последствиями вредного воздействия на окружающую среду и здоровье людей. Включение в существующие тарифы на электрическую энергию таких составляющих как оплата экологического ущерба, затраты на медицинское обслуживание и др., делает уже сегодня солнечную энергетiku достаточно конкурентоспособной с традиционной.

В Российской Федерации масштабы развития фотоэнергетики пока невелики, в сравнении с показателями в странах лидерах отрасли. Это связано с тем, что солнечные электростанции устанавливаются не повсеместно, а в энергетически изолированных регионах и местах с наиболее благоприятными

природно-климатическими условиями, где их использование характеризуется высокими значениями эффективности [70].

Наибольшую долю рынка строительства солнечных электростанций в России занимает компания ГК «Энергия Солнца», на которую приходится 35,5 % проектов, далее идут ООО «Авелар Солар Технолоджи» (ГК «Хевел) - 29,5% и «Солар Системс», занимающая 20,3%.

В настоящее время в России введены в эксплуатацию одиннадцать промышленных солнечных электростанций (СЭС), передающие энергию в Единую энергетическую систему (ЕЭС) России: «Белгородская» СЭС, установленной мощностью 100 кВт, введена в 2010 г. (ООО «АльтЭнерго», Белгородская обл., Яковлевский район, х. Крапивненские дворы); «Наримановская» СЭС, установленной мощностью 250 кВт, введена в 2014 г. (ГК «Энергия Солнца», Астраханская обл.); «Кош-Агачская» СЭС, установленной мощностью 10 МВт, первая очередь введена в 2014 г., вторая – в 2015 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Алтай, Кош-Агачский район, Теленгит-Сортогойское сельское поселение); «Переволоцкая» СЭС, установленной мощностью 5 МВт, введена в 2015 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Оренбургская обл.); «Бурибаевская» СЭС, установленной мощностью 20 МВт, первая очередь введена в 2015 г., вторая – в 2016 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Башкортостан, Хайбуллинский район, с. Бурибай); «Орская» («Сакмарская») СЭС, установленной мощностью 25 МВт, введена в эксплуатацию в 2015 г. (ПАО «Т Плюс», Оренбургская обл., г. Орск); «Абаканская» СЭС, установленной мощностью 5,198 МВт, введена в эксплуатацию в 2015 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», респ. Хакасия, г. Абакан); «Бугульчанская» СЭС, установленной мощностью 15 МВт, первая очередь введена в 2015 г., вторая – в 2016 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Башкортостан, Куюргазинский район, с. Бугульчан), «Усть-Канская» СЭС, установленной мощностью 5 МВт, введена в 2016 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Алтайский край); «Грачевская» СЭС, установленной мощностью 10 МВт, введена в 2017 г. (ООО «Авелар Солар

Технолоджи», Оренбургская обл.); «Плешановская» СЭС, установленной мощностью 10 МВт, введена в 2017 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Оренбургская обл.) [61-65,68,69,70,71,73].

Также необходимо отметить крупные солнечные электростанции, поставляющие электроэнергию в Крымскую энергосистему, имеющие большое значения для Крымского региона, являющегося одновременно регионом военного и рекреационного значения, требующего повышения энергетической безопасности посредством создания собственных рассредоточенных энергогенерирующих установок, не наносящих вреда экосистеме полуострова. В настоящее время в Крыму построено семь фотоэлектрических станций (включая «Севастопольскую» СЭС, ООО «С. Энерджи-Севастополь»), суммарной установленной мощностью 410 МВт, из которых 300 МВт введены в эксплуатацию, покрывающие более 5 % потребности электроэнергии региона [12,39,57].

В перспективных планах развития электроэнергетики России, согласно «дорожной карте» Национальной технологической инициативы «Энерджинет» предусмотрен переход на интеллектуальные активно-адаптивные сети «Smart Grid», предполагающие увеличение масштабов использования ВИЭ и, в частности, фотоэнергетики [29, 91]. До 2020 г. включительно в РФ планируется ввод более пятидесяти солнечных электростанций, суммарной установленной мощностью 1520 МВт [7,64,65].

Более широкому внедрению солнечных электростанций препятствует ряд причин, основными из которых являются: высокая стоимость, низкий КПД, несовершенство технологий накопления энергии. Специалистами различных стран, включая Россию, ведется работа по снижению влияния изложенных факторов. Большой вклад в этом направлении внесли А.Ф. Иоффе, Ж.И. Алферов, Д.С. Стребков, Г. Раушенбах, М. Принс, А.П. Ландсман, Дж. Лоференский, В.В. Харченко, В.А. Майоров и другие [33].

На рисунке 2 показан график, показывающий динамику удельной стоимости солнечных установок и модулей с кремниевыми фотоэлементами,

из которого видно, что снижение стоимости как установок, так и модулей происходит быстрыми темпами за счет их технологического и технического усовершенствования, что подтверждают значения эффективности модулей, изготовленные в разные года (рисунок 3) [120].

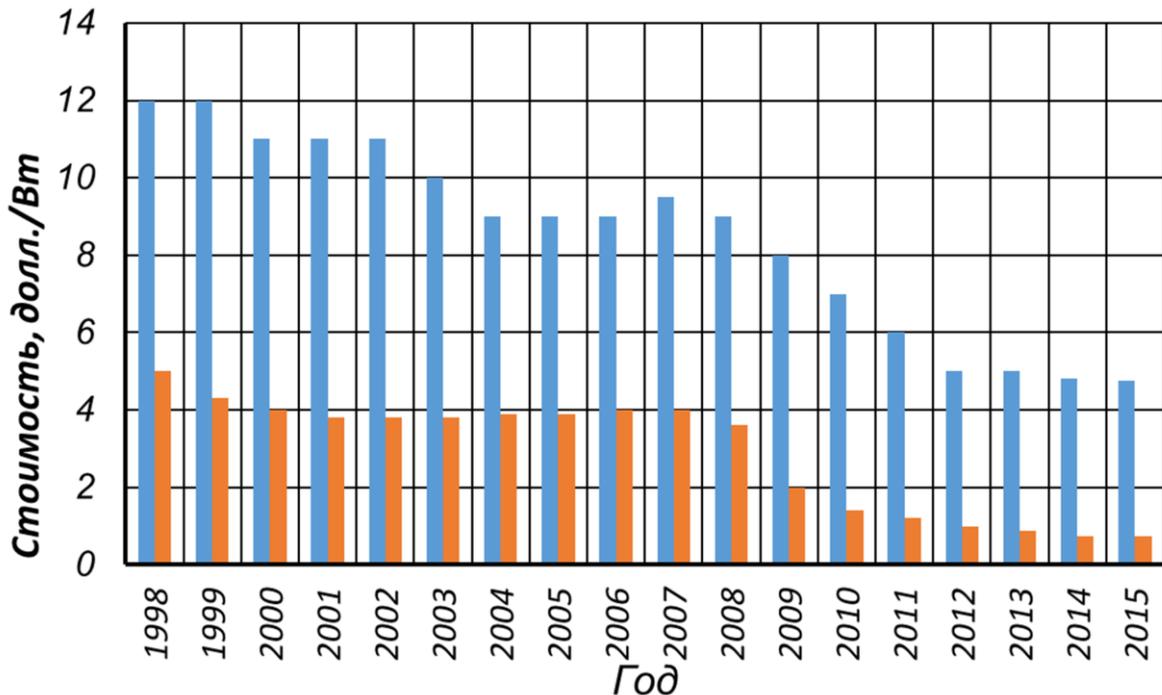


Рисунок 2 - Динамика удельной стоимости солнечных установок (■) и модулей с кремниевыми фотоэлементами (■)

Одной из основных тенденций развития фотоэнергетики в мире, является создание новых технологий изготовления фотоэлектрических элементов и модулей, ориентированная на уменьшение стоимости и повышении КПД.

В первой половине XX века КПД фотоэлементов составлял не более 1%. В настоящее время средний показатель КПД самых распространенных кремниевых элементов составляет 14-18%. Элементы, изготовленные на основе каскадных гетероструктур, имеют эффективность до 36,9%, а с использованием арсенида галлия (GaAs) до 47,5%. Теоретический КПД наземных каскадных солнечных элементов составляет 49 % [3].

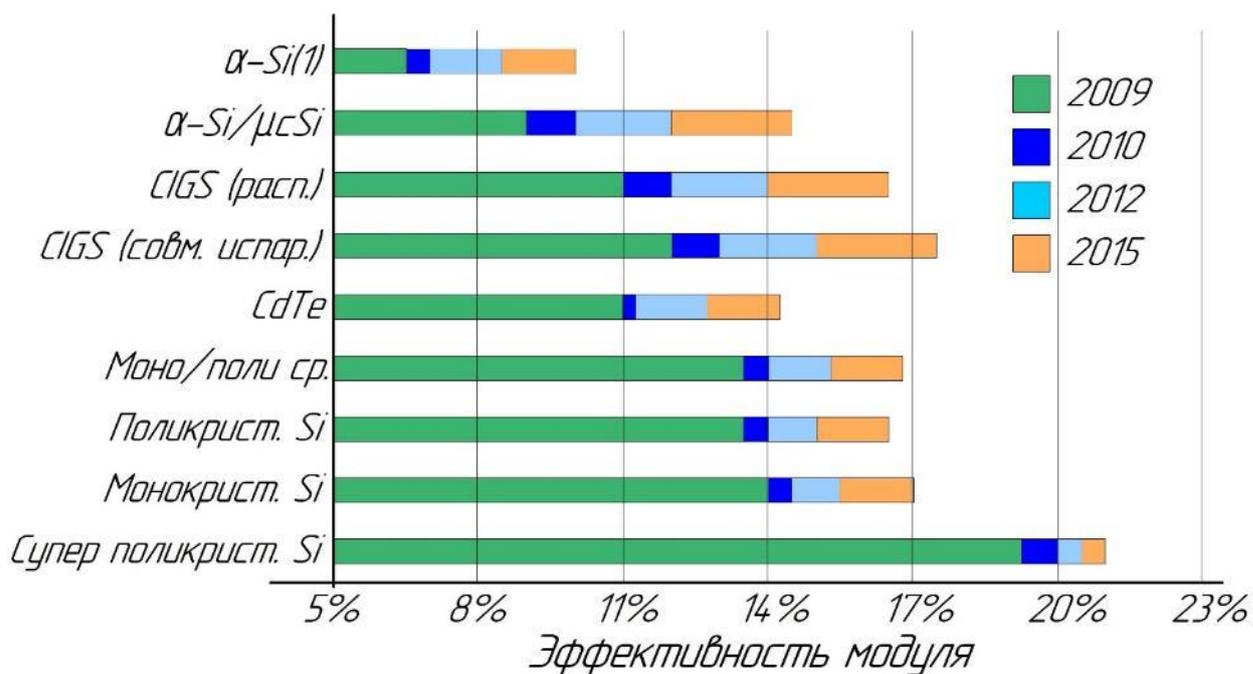


Рисунок 3 - Значения эффективности модулей

При этом необходимо отметить, что стоимость таких установок является все ещё высокой, что призывает продолжать вести работы в данном направлении. Причем в усовершенствовании нуждаются не только фотоэлектрические модули, но и все дополнительные элементы, входящие в установку, – преобразовательные устройства, опорные конструкции, системы аккумулирования энергии и многие другие, значительно влияющие на её стоимость в целом. Данные Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) показывают, что стоимость солнечной установки может до четырех-пяти раз превышать стоимость модулей [120].

1.2 Анализ основных технических средств повышения энергетической эффективности промышленных фотоэлектрических установок

Усовершенствование дополнительных элементов фотоэлектрических установок, кроме снижения стоимости, должно быть направлено на повышение надежности и стабильности энерговыдачи в условиях изменяющихся параметрах окружающей среды, или воздействии внешних факторов (затенение, загрязнение и т.д.), а также на достижение максимальной

энергетической эффективности. С этой целью в последние годы был создан ряд новых устройств и технологий, основными из которых являются [34,104,86]:

- применение солнечных концентраторов;
- использование активных систем слежения за солнцем;
- использование многорядных конструкций.

Солнечные концентраторы позволяют увеличить интенсивность излучения, поступающего на фотоэлектрические преобразователи, увеличивая количество получаемой от них электрической энергии [41]. К тому же концентрированное излучение увеличивает значение КПД преобразования солнечного излучения [42].

В настоящее время создано большое количество вариантов конструкций солнечных концентраторов [6,10,26,40], разделить которые можно на две основные группы: низкопотенциальные (рисунок 4 а,б,в) - с прямолинейной, или криволинейной образующей отражающей поверхности и высокопотенциальные (рисунок 4 г,д) - линзы, или с отражающей поверхностью близкой к форме поверхностей вращения второго порядка: эллипсоида, параболоида, полусферы, гиперболоида.

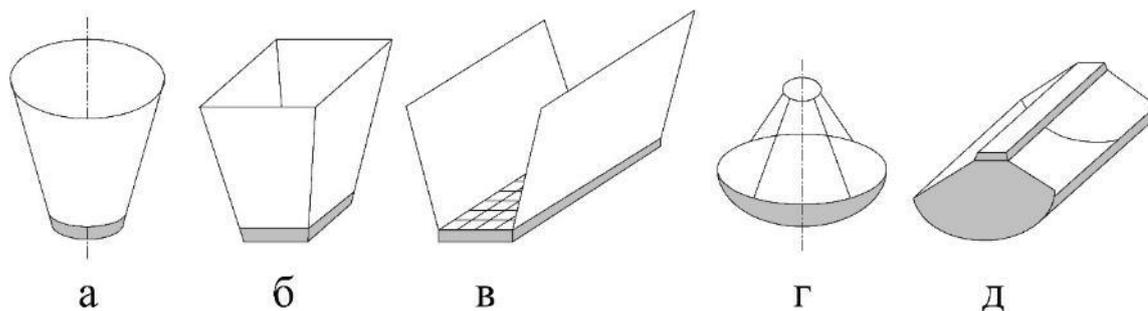


Рисунок 4 – Примеры солнечных концентраторов

(низкопотенциальные: а – фокон, б – фоклин, в – фоклин с двумя отражающими гранями; высокопотенциальные: г – параболоид вращения, д – параболический цилиндр)

Низкопотенциальные концентраторы позволяют получать невысокие значения коэффициентов концентрации в сравнении с высокотемпературными. При этом их использование может не требовать

наличия систем активного охлаждения, что положительно сказывается на массогабаритных характеристиках и цене. Кроме того, они не требуют высокой точности изготовления зеркальной поверхности отражателя и высокой точности позиционирования на Солнце.

Однако, при всей кажущейся привлекательности, использование солнечных концентраторов не получает широкого применения в промышленной генерации электроэнергии фотоэлектрическими установками. Это связано с тем, что их использование требует значительного усложнения конструкции и её эксплуатации, увеличением материалоемкости и затрат на изготовление концентраторов (особенно, имеющих сложную геометрию), наличия дополнительных средств отвода тепла, необходимость довольно точной ориентации на Солнце и т.д. Кроме этого, наиболее распространенные кремниевые фотоэлементы, не рассчитаны на работу в условиях концентрированного излучения, что требует использования значительно более дорогих фотоэлектрических преобразователей.

Использование активных систем слежения за солнцем, также позволяет получать большее количество электрической энергии от фотоэлектрических установок за счет обеспечения поступления большего количества солнечного излучения на поверхность солнечных элементов [94]. Кроме того, такие системы увеличивают дневной интервал энерговыработки.

Все системы слежения, используемые в солнечных энергоустановках, по степени пространственной ориентации можно разделить на две основные категории – с частичной (азимутальной, или зенитальной) ориентацией (рисунок 5а) и полной (азимутальной и зенитальной) ориентацией (рисунок 5б).

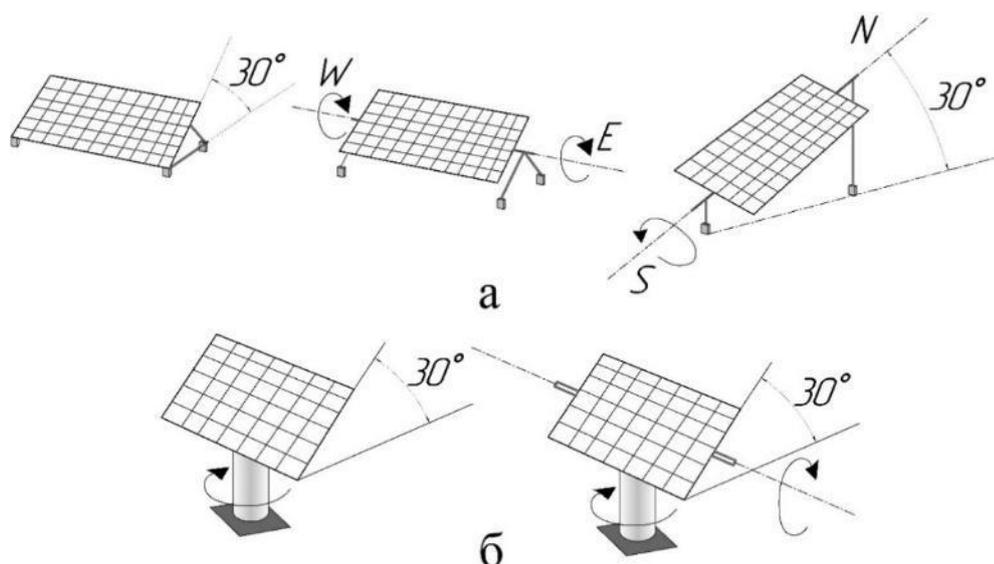


Рисунок 5 – Системы слежения за солнцем
(а – с частичной ориентацией; б – с полной ориентацией)

Системы с частичной ориентацией не способны обеспечить перпендикулярность солнечных лучей на поверхность солнечных элементов в течение всего светового дня, в отличие от систем с полной ориентацией, однако они дешевле и надежнее последних. При этом, системы слежения с полной коммутацией, позволяют обеспечить не только большее количество поступления солнечной энергии, но и использовать солнечные модули с более дешевыми материалами покрытий за счет сведения к минимальным значениям коэффициентов отражения и преломления света.

В среднем, использование систем с частичной ориентацией, позволяет увеличить суточную энерговыработку фотоэлектрических установок на 20-25 %, а с полной до 32 % [66,58]. Также к достоинствам таких систем можно отнести возможность дополнительного повышения энерговыдачи, за счет их использования в комплексе с некоторыми типами солнечных концентраторов. Это становится возможным за счет обеспечения равномерного освещения отраженным излучением всех солнечных элементов установки.

Основными недостатками использования систем слежения являются их высокая стоимость (в большинстве случаев, в два и более раза превышающая стоимость модулей), необходимость регулярного дорогостоящего сервисного

обслуживания (обычно, не реже раза в два года), снижение надежности. Также, широкому использованию данных систем, в промышленной генерации электрической энергии фотоэлектрическими преобразователями, препятствует тот факт, что их использование приводит к взаимному затенению, при относительно близком поперечном размещении установок. Следствием этого является существенное снижения вырабатываемой мощности всей солнечной электростанции, как будет показано в последующих разделах. Примеры таких случаев представлены на рисунке 6. Более редкое размещение на территории станции является также не эффективным решением вследствие снижения удельной мощности, что приводит к увеличению площади и дополнительным электрическим потерям.



Рисунок 6 - Затенение фотоэлектрических установок с системами слежения за солнцем

Ещё одним способом увеличения эффективности фотоэлектрических установок является увеличение их удельной мощности. Для этого используют многорядные конструкции, позволяющие размещать фотоэлектрические модули в несколько рядов на одной опоре. Такое решение также позволяет

уменьшить общую стоимость несущих конструкций, за счет снижения материалоемкости и трудозатрат на строительные и монтажные работы.

Все многорядные конструкции, используемые на стационарных фотоэлектрических электростанциях, по расположению фотоэлектрических модулей, можно разделить на два типа: горизонтальное (рисунок 7а) и вертикальное (рисунок 7б) расположением [55]. Анализ мировых промышленных солнечных электростанций показал, что при использовании первого типа конструкций, размещают, как правило, не более семи рядов модулей (например, Абаканская солнечная электростанция), а при использовании второго - не более трех (например, Севастопольская солнечная электростанция).

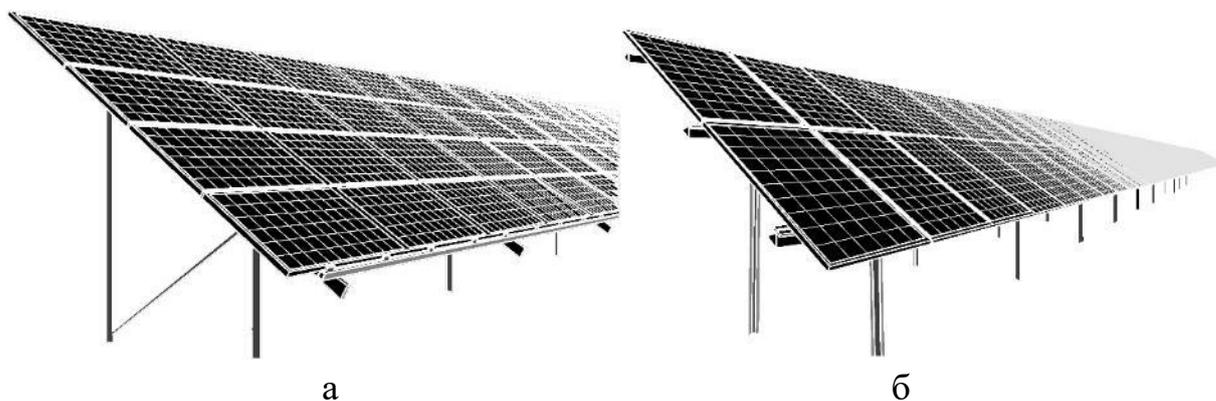


Рисунок 7 – Многорядные конструкции расположения фотоэлектрических модулей
(а – горизонтальное; б – вертикальное)

Несмотря на преимущества таких конструкций, их использование может являться причиной значительного снижения энерговыработки солнечных электростанций [46]. Это связано с тем, что при невысоких значениях высоты солнца происходит затенение фотоэлектрических модулей нижнего ряда (рисунок 8). Исследования проектов мировых солнечных электростанций, в совокупности с географическими данными, показывают, что около 70% из них работают в таких условиях достаточно продолжительный период в году.



Рисунок 8 – Затенение фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях

В этом случае, на значение величины возникающих энергетических потерь, основное влияние оказывает вариант расположения фотоэлектрических модулей (вертикальный или горизонтальный) и вариант коммутации (рядный, или блочный). При этом влияет не само расположение модулей, а направление коммутации солнечных элементов в них, схема включения шунтирующих диодов и их количество. Однако в связи с тем, что подавляющее большинство промышленных модулей имеют направление коммутации солнечных элементов вдоль большей стороны, образуя три равные последовательные группы с параллельно включенными шунтирующими диодами, можно считать, что имеет значение именно расположение модулей.

Влияние расположения модулей на значение энергетических потерь связано с тем, что при частичном затенении любой группы солнечных элементов происходит её шунтирование диодом. Таким образом, при горизонтальном расположении модулей, в случае возникновения затенения элементов нижних рядов, не происходит шунтирования остальных (не затенённых) групп модулей (рисунок 9б), а при вертикальном - отключаются (шунтируются) все группы, так как каждая из них включает затененные солнечные элементы нижнего ряда (рисунок 9а). Однако, необходимо отметить, что не все производители фотоэлектрических модулей позволяют осуществлять их крепление в горизонтальном положении [79].

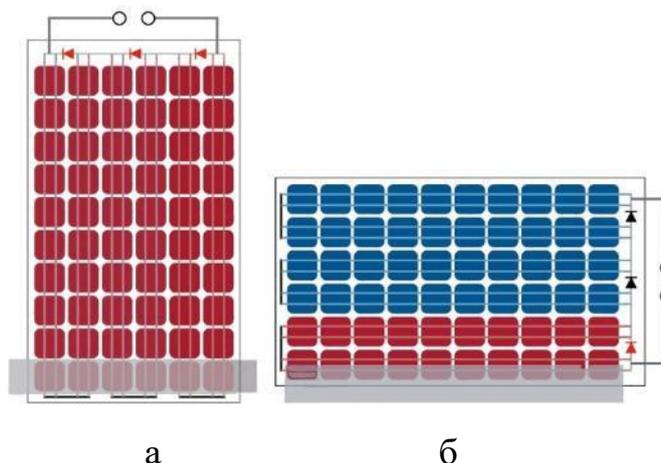


Рисунок 9 – Отключение групп солнечных элементов фотоэлектрического модуля шунтирующими диодами
(а – при блочной коммутации; б – при рядной коммутации)

Различные варианты коммутации фотоэлектрических модулей, также существенно влияют на значение энергетических потерь. Основными вариантами коммутации, применяемыми на промышленных солнечных электростанциях, являются «блочная» и «рядная» (рисунок 10). При блочной коммутации используется меньше проводов, чем при рядной, что положительно сказывается на эффективности передачи электрической энергии от модулей к инверторам. Однако, в случае возникновения затенения, все массивы модулей (кроме первого ряда) работают в условиях частичного затенения. Более того, входной диапазон напряжений инвертора может быть выше диапазона напряжений вблизи точки максимальной мощности таких массивов, вследствие чего отбор энергии от них будет осуществляться в неоптимальном режиме. Примером такого случая является снижение энергетической выработки Севастопольской солнечной электростанции, где перекоммутация модулей с блочной вертикальной на рядную позволила увеличить суточную энерговыработку станции в зимнее время более чем в 2 раза [46]. Использование рядной коммутации позволяет избежать работу верхних массивов модулей в условиях частичного затенения, повышая эффективность всей станции, при этом нижние (затененные) массивы значительно ограничены в энергоотдаче.

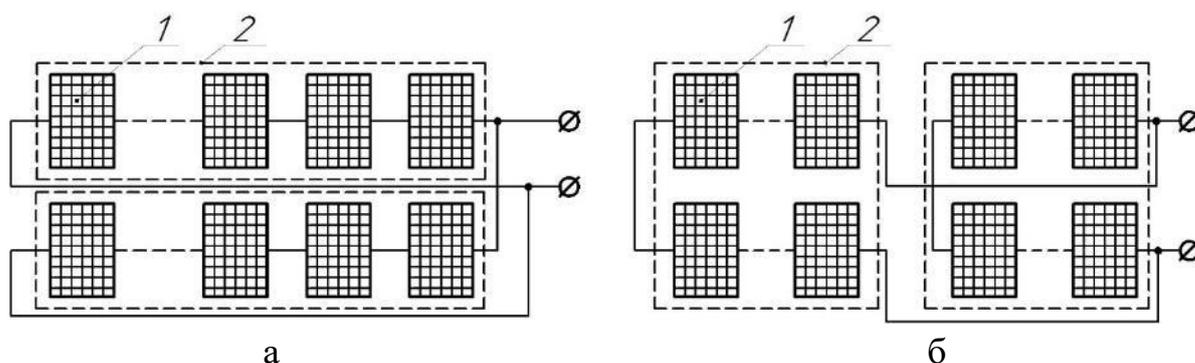


Рисунок 10 – Варианты коммутации фотоэлектрических модулей
 а – рядная; б – блочная
 (1 – фотоэлектрический модуль; 2 – массив модулей)

Анализ приведенных способов повышения эффективности показывает, что их использование, в основном, затруднено проблемами, связанными с неравномерным освещением солнечных элементов. В связи с этим решение данной проблемы является важной задачей для дальнейшего развития промышленной фотоэнергетики.

1.3 Анализ существующих способов отбора электрической энергии от фотоэлектрических установок, работающих в условиях неравномерной освещенности

В настоящее время существует ряд способов отбора электрической энергии, позволяющих частично нивелировать проблему неравномерного освещения фотоэлектрических установок. К таким способам относят использование шунтирующих диодов, индивидуальных согласующих DC-DC преобразователей (ИСП), микро-инверторов, перестраиваемых коммутационных систем и дифференцированных систем отбора максимальной мощности.

Применение шунтирующих диодов позволяет исключить влияние затенённых модулей, на энерговыработку других (незатененных) модулей, находящихся в одной последовательной цепи. Без их использования ток всего массива последовательно соединенных модулей не превышает тока наименее

освещенного фотоэлемента [72]. При этом происходит рассеивание энергии на затененном элементе (так называемый «эффект горячего пятна») с последующим его повреждением [15]. В связи с этим шунтирующие диоды также выполняет защитную функцию модуля, предохраняя его от повреждения.

Шунтирующие диоды, располагают непосредственно на выходных клеммах модулей. Их подключают таким образом, чтобы они проводили ток в прямом направлении ($I_{ш1}$, $I_{ш2}$) при приложении обратного напряжения смещения ($U_{п1}$, $U_{п2}$) к затененным панелям (рисунок 11). Обратное напряжение смещения возникает в том случае, если ток, текущий по последовательной цепочке ($I_{\text{модуля}}$), создает падение напряжения на затененном участке большее, чем напряжение, вырабатываемое самой группой затененных панелей. При этом потерями является только мощность, рассеиваемая в самих диодах, вследствие падения напряжения на них.

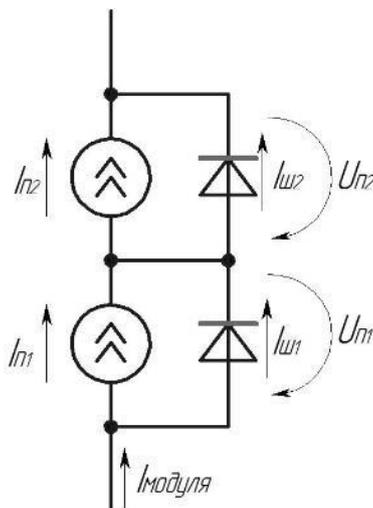


Рисунок 11 – Включение шунтирующих диодов с фотоэлектрическими модулями

Использование шунтирующих диодов является обязательным условием для надежной работы фотоэлектрических установок, однако они не способны решить все проблемы, возникающие в условиях неравномерной освещенности. К таким проблемам, можно отнести:

1. отключение достаточно большой группы солнечных элементов (имеющую частичное, или полное затенение), при том, что они почти всегда ещё способны вырабатывать электрическую энергию;
2. снижение напряжение в точке максимальной мощности всего массива солнечных элементов, что приводит к значительному уменьшению его энергетической эффективности при параллельном соединении массивов, или использовании инвертора со значением диапазона входного напряжения превышающим это значение.

С целью решения первой и частично второй проблемы, в последнее время достаточно широко стали использовать индивидуальные согласующие преобразователи и микро-инверторы, устанавливаемые на каждом (в некоторых случаях до 2-х) фотоэлектрическом модуле [15, 112]. Эти устройства устанавливают отбор электрической энергии в точку максимальной мощности для каждого модуля индивидуально, что позволяет получать большее количество энергии от солнечных установок, работающих в условиях неравномерной освещенности. Их использование дает возможность устанавливать модули практически на любой плоскости, или площадке, максимально используя всю доступную площадь. К достоинствам таких устройств можно также отнести то, что большинство из них имеет функцию удаленного мониторинга, что позволяет отслеживать работоспособность каждого модуля, а также осуществлять аналитику основных электрических параметров.

Выходы индивидуальных согласующих преобразователей соединяют последовательно (рисунок 12а), что делает возможным без особого труда внедрять их на уже построенных солнечных электростанциях. Коммутация микро-инверторов производится посредством их параллельного соединения (рисунок 12б), что затрудняет их внедрение на построенных станциях.

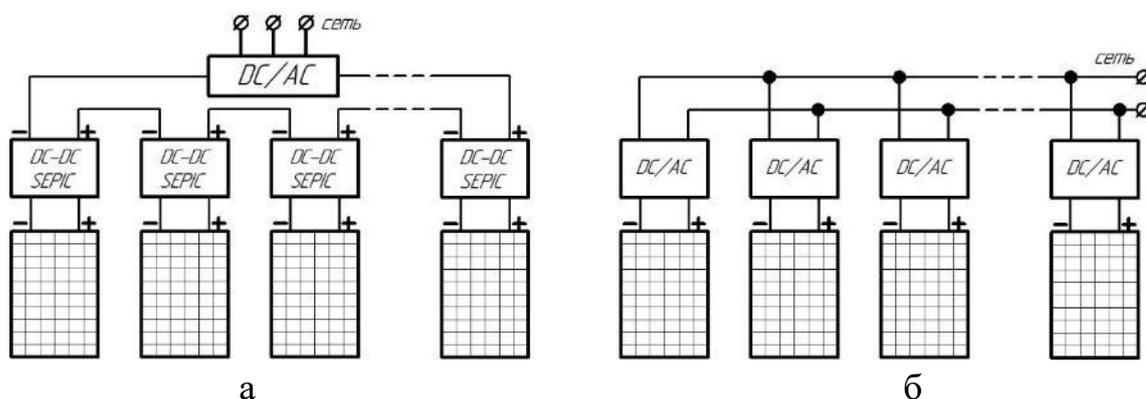


Рисунок 12 – Коммутация индивидуальных согласующих преобразователей (а) и микро-инверторов (б)

Мировым лидером производства и внедрения индивидуальных согласующих преобразователей является американская частная компания «Tigo Energy» [132]. Принцип их работы основан на использовании DC/DC SEPIC преобразователей с системой автоматического управления, устанавливающей режим отбора электрической энергии от модуля в точке максимальной мощности, со значением тока равным току всей батареи в точке максимальной мощности. Это значит, что в случае возникновения затенения одного из модулей, преобразователь снижает значение выходного напряжения, увеличивая выходной ток. Таким образом, не происходит отключение модуля шунтирующими диодами, и он продолжает вырабатывать электрическую энергию, хоть и на сниженной мощности в сравнении с другими последовательно-соединенными не затененными модулями.

Основными недостатками индивидуальных согласующих преобразователей (ИСП) являются:

1. Существенное увеличение стоимости установки (стоимость ИСП составляет около 15-20% стоимости модуля);
2. снижение значения напряжения всего массива фотоэлектрических модулей в точке максимальной мощности, что, как и в случае с шунтирующими диодами, значительно сказывается на энергетической эффективности при параллельной коммутации массивов.

Внедрение микро-инверторов в фотоэнергетике считается одним из наиболее больших технологических сдвигов в данной отрасли на сегодняшний день [114]. Производители гарантируют увеличение энерговыработки солнечных установок на 5-25% за счет их использования [130]. Лидером по внедрению и продвижению данных устройств является американская компания Enphase Energy, создавшая первый успешный коммерческий микро-инвертор. В настоящее время многими компаниями были оценены преимущества данной разработки, вследствие чего, они начали самостоятельно разрабатывать и выпускать микро-инверторы [114].

Принцип работы микро-инвертора аналогичен центральному инвертору, основным отличием является только мощность. Положительный эффект от их работы достигается за счет того, что они также, как и ИСП, оптимизируют работу каждого модуля по отдельности, позволяя при любых условиях работать в точке максимальной мощности. Отсутствие центрального инвертора также положительно сказывается на надежности установки и делает её более гибкой в возможностях последующего расширения, упрощает монтажные работы и увеличивает срок службы за счет отсутствия систем активного охлаждения.

Несмотря на все достоинства использования микро-инверторов, им свойственен ряд недостатков, основными из которых являются:

1. Высокая стоимость. Использование микро-инверторов вместо центрального на промышленных электростанциях в среднем обходится дороже на 50-85%.
2. Сниженная энергетическая эффективность при равномерной освещенности солнечных элементов. Это обусловлено тем, что КПД микро-инверторов меньше чем у центрального в среднем на 2,5-4%, а также тем, что напряжение в соединительных проводах имеет более низкие значения напряжений.

3. Отсутствие возможности внедрения на существующих электростанциях с центральным инвертором для решения проблем неравномерной освещенности.

Еще одним способом повышения энергетической эффективности солнечных установок, работающих в условиях неравномерной освещенности, является применение перестраиваемых коммутационных систем. Практического внедрения на промышленных солнечных электростанциях данный способ пока не получил. Однако в настоящее время учеными и исследователями многих стран мира ведутся активные работы в данном направлении [96,99,126].

Принцип работы перестраиваемых коммутационных систем заключается в том, что при помощи коммутационной матрицы производится такая коммутация, при которой затененные модули, находящиеся в разных массивах, включаются в один массив, а их места замещаются нормально освещенными модулями (рисунок 13).

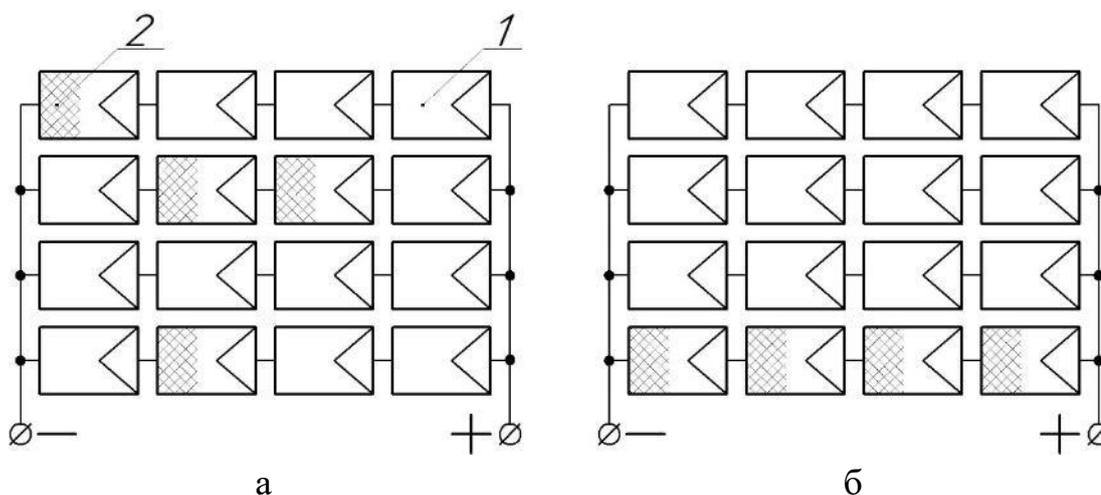


Рисунок 13 – Принцип работы перестраиваемых коммутационных систем
 а – солнечные модули до перекоммутации; б – перекоммутированные модули
 (1 – нормально освещенный модуль; 2 – затененный модуль)

Использование такого способа позволяет частично решить одновременно и проблему отключения затененных модулей шунтирующими диодами, и проблему рассогласованности по напряжению параллельно

соединенных массивов модулей, работающих в условиях неравномерной освещенности. При этом недостатками способа являются:

1. Практическая сложность реализации способа на промышленных солнечных электростанциях.
2. Высокая стоимость, обоснованная использованием дорогостоящих коммутационных матриц и большим количеством соединительных проводов, рассчитанных на ток не менее 10 А.
3. Неэффективность при небольшом количестве затенённых солнечных модулей.

Согласовать по напряжению параллельные массивы модулей, позволяет также использование дифференцированных систем отбора максимальной мощности, структурная схема которых изображена на рисунке 14 [96]. Принцип работы таких систем заключается в том, что параллельные массивы модулей передают электрическую энергию через активные стабилизаторы напряжения, устанавливающие их выходное напряжение до одного номинала. При этом преобразователи производят поиск точки максимальной мощности (MPPT) и её оптимизацию. Это позволяет осуществить максимальный отбор электрической энергии от каждого массива при их различной освещенности, температуре или использовании фотоэлектрических панелей в массивах с различными характеристиками.

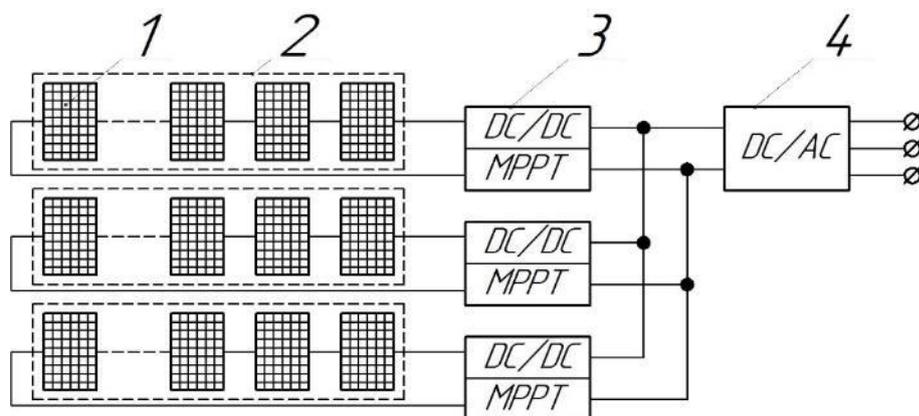


Рисунок 14 – Структурная схема дифференцированных систем отбора максимальной мощности

(1 – модуль; 2 – массив модулей; 3 – стабилизаторы напряжения с MPPT; 5 - инвертор)

Основными недостатками использования таких систем являются:

1. Высокая стоимость и материалоемкость, связанная с тем, что используемые стабилизаторы рассчитаны на мощность со значением не ниже номинальной мощности массивов модулей, в которые они установлены.
2. Снижение энергетической эффективности за счет того, что для согласования по напряжению производится преобразование всей энергии, вырабатываемой массивом. Таким образом происходит снижение выходной мощности на величину КПД стабилизаторов.

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время существует достаточно большое количество технических решений, позволяющих частично нивелировать влияние неравномерного освещения на энерговыработку фотоэлектрических модулей. При этом каждое из них имеет свои особенности, которые ограничивают их повсеместное использование на солнечных электростанциях, имеющих большое разнообразие проектных решений, включающих различные варианты опорных конструкций, коммутаций солнечных элементов, систем ориентации, характера освещенности и т.д. В связи с этим для оценки эффективности от их внедрения необходимо создание математических моделей, результатом решений которых являются значения энергетических потерь солнечных установок с различными вариантами коммутации солнечных элементов и способами отбора электрической энергии.

При этом часть способов изначально не представляется перспективными для внедрения на промышленных энергоустановках вследствие практической сложности их осуществления, высокой стоимости или невозможности встраивания на действующих установках. К таким способам относятся способы, позволяющие решить проблему согласования по напряжению массивов фотоэлектрических модулей при параллельной коммутации, - перестраиваемые коммутационные системы, микроинверторы и

дифференцированные системы отбора максимальной мощности. Вследствие этого, также одной из актуальных задач является создание экономически оправданного способа, позволяющего осуществлять отбор электрической энергии от параллельных групп фотоэлектрических модулей.

Выводы по разделу:

Проведен обзор современного состояния и направлений развития фотоэнергетики, выполнен анализ основных технических средств повышения энергетической эффективности промышленных фотоэлектрических установок и существующих способов отбора от них электрической энергии в условиях неравномерной освещенности.

В результате анализа было установлено, что одной из значительных проблем снижения энергетической эффективности солнечных установок является неравномерная освещенность солнечных элементов. Эта проблема существует на всех фотоэлектрических станциях и более существенно проявляет себя при использовании ряда технических решений, направленных на повышение их эффективности - применении солнечных концентраторов, систем слежения за солнцем и многорядных конструкций, ограничивая возможности их использования.

Специалистами различных стран, включая Россию, ведется работа по повышению эффективности СФУ. Большой вклад в этом направлении внесли А.Ф. Иоффе, Ж.И. Алферов, Д.С. Стребков, Г. Раушенбах, М. Принс, А.П. Ландсман, В.В. Харченко, В.А. Майоров и другие.

Существующие способы отбора электрической энергии от СФУ, работающих в условиях неравномерной освещенности заключающиеся в использовании шунтирующих диодов, ИСП, микро-инверторов, перестраиваемых коммутационных систем и дифференцированных систем отбора максимальной мощности в ряде случаев не являются эффективными или экономически оправданными решениями. Шунтирующие диоды

отключают (шунтируют) группы солнечных элементов, имеющие частичное затенение и приводят к рассогласованности по напряжению в точке максимальной мощности параллельные массивы фотоэлектрических модулей. ИСП значительно увеличивают стоимость установки и также приводят к рассогласованности по напряжению параллельные массивы модулей. Микроинверторы существенно увеличивают стоимость установок, снижают их эффективность в условиях равномерной освещенности и не могут быть использованы на существующих станциях с центральным инвертором. Перестраиваемые коммутационные системы являются дорогим и неэффективным при небольшом количестве затенённых солнечных модулей решением. Дифференцированные системы отбора максимальной мощности также являются дорогостоящим, энергетически неэффективным решением.

РАЗДЕЛ 2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

2.1 Математическая модель солнечного элемента

Для теоретического анализа процессов, происходящих в СФУ с различными вариантами коммутации солнечных элементов, работающих в условиях неравномерного освещения, необходимо составить математическую модель солнечного элемента, с точностью достаточной для инженерных расчетов - не выходящую за пределы конструктивного допуска.

Для моделирования характеристик солнечного элемента используется различные эквивалентные схемы замещения [14,36,50,72,95,118,134], наиболее распространенные варианты которых изображены на рисунке 15:

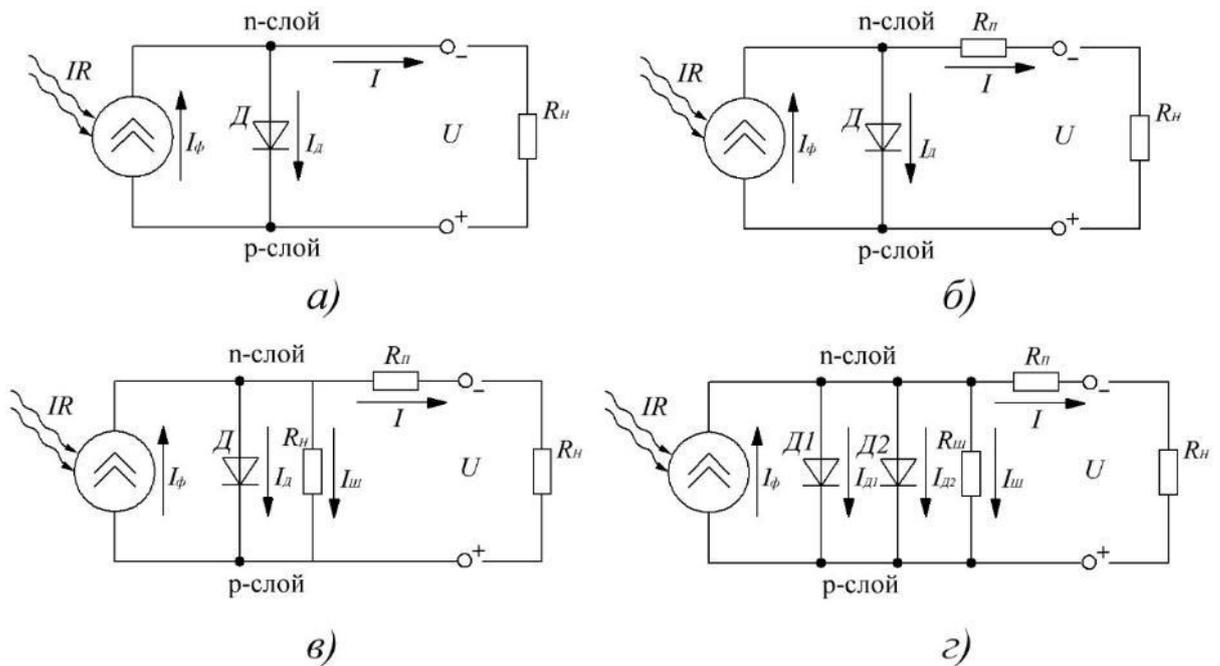


Рисунок 15 – Эквивалентные схемы замещения солнечного элемента
(а - идеализированная; б - упрощенная; в - обобщенная;
г - с двойным экспоненциалом)

Каждый из вариантов имеет свои достоинства и недостатки. «Идеализированная» схема (рисунок 15а) не позволяет построить характеристики солнечного элемента достаточные для инженерных расчетов вследствие того, что она не учитывает ток утечки и внутреннее сопротивление. Согласно закону Кирхгофа и уравнения Шокли аналитическое уравнение эквивалентной схемы примет вид:

$$I = I_{\phi} - I_{д} = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где I – ток нагрузки, (А);

I_{ϕ} – фототок, (А);

$I_{д}$ – ток, текущий через диод, (А);

I_0 – обратный ток насыщения, (А);

q – заряд электрона, ($1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл);

U – выходное напряжение, (В);

k – постоянная Больцмана, ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T – абсолютная температура солнечного элемента, (К).

Значительно более лучшие результаты моделирования можно получить, используя «Упрощенную» схему (рисунок 15б) так как в ней учитывается последовательное сопротивление ($R_{п}$), характеризующее внутреннее сопротивление солнечного элемента и контактов, но в ней не учитываются токи утечки, возникающие из-за наличия обратного сопротивления р-п-перехода, различных проводящих пленок, или загрязнения [14]. Аналитическое уравнение такой схемы примет вид:

$$I = I_{\phi} - I_{д} = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_{п})}{AkT} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

где $R_{п}$ – последовательное сопротивление солнечного элемента, (Ом);

A – коэффициент идеальности, зависящий от толщины р-п-перехода и материала, принимает значения для кремниевых солнечного элемента от 1,2 до 5 (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициента идеальности солнечного элемента от материала [3]

Материал	Коэффициент A
Si – монокристаллический	1,2
Si - поликристаллический	1,3
a-Si:H – аморфный гидрогенизированный	1,8
a-Si:H двойной	3,3
a-Si:H тройной	5

«Обобщенная» схема (рисунок 15в) учитываются токи утечки за счет включения шунтирующее сопротивление ($R_{ш}$), однако расчетные данные показывают, что включение шунтирующего сопротивления не значительно влияет на результаты моделирования кремниевых солнечных элементов ввиду довольно большого значения сопротивления [8, 100]. Аналитическое уравнение такой схемы имеет вид [133]:

$$I = I_{\phi} - I_{д} - I_{ш} = I_{\phi} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U+IR_{п})}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U+IR_{п}}{R_{ш}}, \quad (3)$$

где $I_{ш}$ – ток, текущий шунтирующее сопротивление, (А);

$R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление солнечного элемента, (Ом).

Ещё более точную модель солнечного элемента характеризует эквивалентная схема «С двойным экспоненциалом» (рисунок 15г). Такая схема достаточно точно описывает характеристики поликристаллического солнечного элемента за счет наличия двух параллельно включенных диодов, показывающих протекание через р-п-переход диффузионный и рекомбинационный ток. Недостатком такой схемы является сложность нахождения параметров для построения характеристик [105]. Аналитическое уравнение схемы записывается в следующем виде:

$$I = I_{\phi} - I_{д1} - I_{д2} - I_{ш} = \\ = I_{\phi} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(U+IR_{п})}{kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(U+IR_{п})}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U+IR_{п}}{R_{ш}}, \quad (4)$$

где $I_{д1}$ – ток, текущий через диод Д1, (А);

$I_{д2}$ – ток, текущий через диод Д2, (А);

I_{01} – обратный ток насыщения, определяемый диффузионным механизмом протекания тока через тонкий р-п-переход [125], (А);

I_{02} – обратный ток насыщения, возникающий вследствие рекомбинации в области p-n-перехода [123], (А).

Учитывая вышеизложенное, для составления математической модели солнечного элемента, в качестве эквивалентной схемы, принята «Упрощенная» схема, допускающая отсутствие токов утечки, то есть $R_{ш} \rightarrow \infty$. Соответственно в качестве аналитического уравнения, используемого в основе модели, лежит уравнение (2).

Из рисунка 15 видно, что фототок (I_{ϕ}) может быть вычислен из тока короткого замыкания при различных условиях освещенности и температуры посредством деления тока, предполагая, что при коротком замыкании ток, текущий через диод незначительный и практически весь выработанный ток течет в нагрузку. Согласно этому:

$$I_{\phi} = [I_{кз(сy)} + K_i(T - T_{сy})] \frac{\beta}{\beta_{сy}} \cdot \frac{R_{ш} + R_s}{R_{ш}}, \quad (5')$$

или, с учетом принятого допущения, что $R_{ш} \rightarrow \infty$:

$$I_{\phi} = [I_{кз(сy)} + K_i(T - T_{сy})] \frac{\beta}{\beta_{сy}}, \quad (5)$$

где $I_{кз(сy)}$ – ток короткого замыкания солнечного элемента при стандартных условиях, (А);

K_i – температурный коэффициент тока короткого замыкания солнечного элемента, (А/К);

T – температура солнечного элемента, К;

$T_{сy}$ – температура при стандартных условиях, (298 К);

β – интенсивность солнечного излучения, (Вт/м²);

$\beta_{сy}$ – интенсивность солнечного излучения при стандартных условиях, (1000 Вт/м²).

Обратный ток насыщения I_0 существенно зависит от температуры солнечного элемента, в то время как изменение фототока не столь велико, как видно из уравнения (6). В результате увеличения температуры, уменьшается высота потенциального барьера и концентрация неосновных носителей заряда

растет по экспоненциальной зависимости, что приводит к увеличению фототока [84]. На величину обратного тока также оказывает влияние структура и материал солнечного элемента. Таким образом, обратный ток насыщения можно вычислить из уравнения (2), решенного для точки холостого хода:

$$I_0 = \frac{I_\phi}{\exp\left[\frac{q[U_{xx(cy)} + K_u(T - T_{cy})]}{AkT}\right] - 1} \quad (6)$$

где $U_{xx(cy)}$ – напряжение холостого хода солнечного элемента при стандартных условиях, (В);

K_u – температурный коэффициент напряжения холостого хода, (В/К).

Исходя из изложенного, характеристика солнечного элемента будет описываться системой уравнений:

$$\begin{cases} I = I_\phi - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_\pi)}{AkT}\right) - 1 \right], \\ I_\phi = [I_{кз(cy)} + K_i(T - T_{cy})] \frac{\beta}{\beta_{ну}}, \\ I_0 = \frac{I_\phi}{\exp\left[\frac{q[U_{xx(cy)} + K_u(T - T_{cy})]}{AkT}\right] - 1}. \end{cases}$$

Объектом моделирования выбран солнечный элемент производства «КВАЗАР» серии К6М, изготовленный на основе монокристаллического кремния (с-Si) размерами 156x156 мм, класс – Н450, покрытого антиотражающим покрытием из нитрида кремния. В таблице 2 приведены его заводские электрические характеристики, а в таблице 3 – коэффициенты и значения паразитных сопротивлений:

Таблица 2 – Электрические характеристики солнечного элемента «КВАЗАР» серии К6М при стандартных условиях

$U_{xx(cy)}$, В	$I_{кз(cy)}$, А	$P_{мм(cy)}$, Вт	$U_{мм(cy)}$, В	$I_{мм(cy)}$, А
0,58	9,2	4,52	0,53	8,53

Таблица 3 – Коэффициенты и значения сопротивлений солнечного элемента «КВАЗАР» серии К6М

A	K_u , В/К	K_i , А/К	K_t , (К·м ²)/Вт	$R_{п}$, Ом	$R_{ш}$, Ом
1,2	-0,2	0,644	0,033	0.067	8.1

Все указанные заводские параметры измерены при стандартных условиях, значения которых приведены в таблице 4:

Таблица 4 – Стандартные условия измерений

Параметр	Обозначение	Значение
Интенсивность излучения	β_{cy} , Вт/м ²	1000
Температура	T_{cy} , К	298
Воздушная масса	AM1,5	1,5

На основании приведенных параметров и значений, в системе компьютерной алгебры Mathcad Prime 3, построены вольт-амперные характеристики для различных значений освещенности и температуры солнечного элемента, изображенные на рисунке 16:

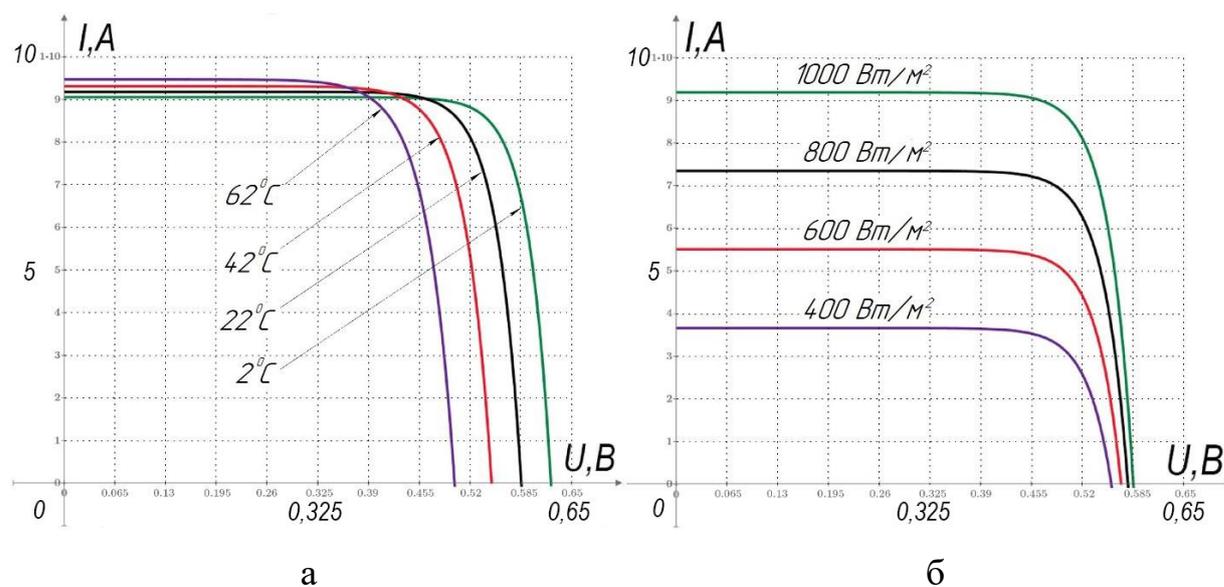


Рисунок 16 - Вольт-амперные характеристики солнечного элемента
а - при различной температуре; б - при различной интенсивности излучения

В случае отсутствия данных о температуре, при моделировании можно сделать допущение, заключающееся в том, что температура солнечного элемента изменяется прямо пропорционально интенсивности излучения [111]. Согласно этому температуру можно вычислить из соотношения:

$$T = T_{oc} + K_t \beta, \quad (7)$$

где T_{oc} – температура окружающей среды (ОС), (К);

K_t – температурный коэффициент повышения температуры, ((К·м²)/Вт).

На рисунке 17 изображены вольт-амперные характеристики солнечного элемента при различной освещенности и температуре, с учетом соотношения (7):

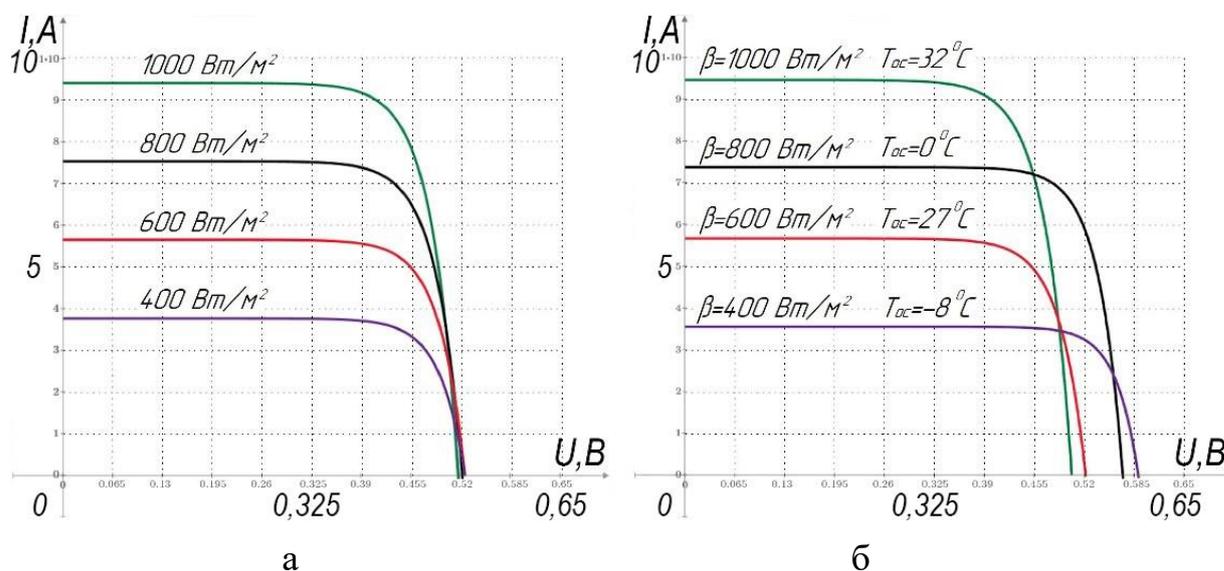


Рисунок 17 – Вольт-амперные характеристики солнечного элемента
а - при одинаковой температуре ОС; б –при различной температуре (ОС)

Сравнение результатов, полученных при моделировании с экспериментальными данными, приведенными в 4-м разделе, показывает достаточно высокую точность полученной модели. Отклонение выходной мощности в точке максимальной мощности, а также значений тока и напряжения в точках холостого хода и короткого замыкания не превышает 1,8%. При этом необходимо отметить, что с увеличением освещенности, точность результатов моделирования увеличивается.

2.2 Теоретический анализ физических процессов в СФУ, работающих в условиях равномерного и неравномерного освещения при последовательной коммутации СЭ

Последовательная коммутация солнечных элементов (СЭ) в СФУ, изображена на рисунке 18:

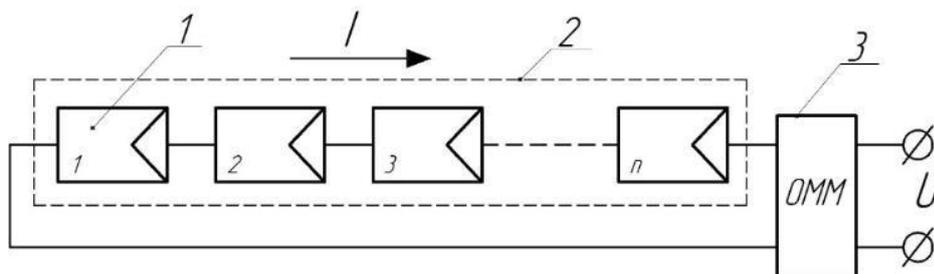


Рисунок 18 - СФУ с последовательно соединёнными СЭ в массив (1 – солнечный элемент, 2 – массив солнечных элементов, 3 – устройство поиска точки максимальной мощности и оптимизации выходной мощности)

При равномерной освещенности массива СЭ, ток I , протекающий через все солнечные элементы, будет постоянным и его значение будет равно значению тока каждого элемента. Напряжение на его выходе будет равно сумме напряжений каждого СЭ. Вольт-амперная характеристика такого массива описывается в соответствии с уравнением (2), основанным на законе Кирхгофа и уравнении Шокли для первого квадранта, с допущением, что шунтирующее сопротивление СЭ незначительно [14,25,28], и с учетом того, что ток, протекающий через каждый элемент одинаковый ($I = I_1 = I_2 = \dots = I_n = const$), а напряжение массива СЭ равно сумме напряжений каждого элемента ($U = \sum_{i=1}^n U_i$):

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_{\pi})}{n(AkT)} \right) - 1 \right], \quad (8)$$

где U – напряжение массива солнечных элементов, (В);

n – количество последовательно соединенных солнечных элементов в массиве.

Решив уравнение (8) относительно U получим:

$$U = \frac{n(AkT)}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} - \frac{I}{I_0} + 1 \right) - IR_{\pi}. \quad (9)$$

Соответственно выходная мощность массива СЭ будет равна:

$$P = IU = I \left[\frac{n(AkT)}{q} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_0} - \frac{I}{I_0} + 1 \right) - IR_{\Pi} \right]. \quad (10)$$

Для получения максимальной мощности отбор электрической энергии от массива СЭ производится посредством устройства поиска точки максимальной мощности и оптимизации выходной мощности (Рисунок 18). Связанно это со спецификой вольт-амперной характеристики солнечного элемента, представляющей обратную экспоненциальную зависимость между током и напряжением, и соответственно имеет одну рабочую точку, в которой мощность СФУ будет максимальна [117,135]. Вследствие этого, мощность на выходе массива СЭ будет определяться точкой экстремума функции $P(U)$. Для нахождения этой точки необходимо найти производную функции $P(U)$:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{q(U + IR_{\Pi})}{n(AkT)} - \ln \left[\frac{I_\phi - I_0}{I_0 \left(1 + \frac{q(U + IR_{\Pi})}{n(AkT)} \right)} \right]. \quad (11')$$

Приравняв $\frac{dP}{dU} = 0$, получим:

$$\frac{q(U + IR_{\Pi})}{n(AkT)} - \ln \left[\frac{I_\phi - I_0}{I_0 \left(1 + \frac{q(U + IR_{\Pi})}{n(AkT)} \right)} \right] = 0. \quad (11)$$

Для решения полученного уравнения можно воспользоваться итерационным численным методом Ньютона [5]. Для этого необходимо преобразовать уравнение (4) в более удобном виде, принимая $\frac{q(U+IR_{\Pi})}{n(AkT)} = U_x$; $I_\phi - I_0 = I_{x1}$; $I_0 = I_{x2}$:

$$f(U_x) = e^{U_x} + e^{U_x} U_x - \frac{I_{x1}}{I_{x2}} = 0. \quad (12)$$

Сжимающее отображение $f(U_x)$ имеет вид:

$$\varphi(U_x) = U_x - \frac{f(U_x)}{f'(U_x)}. \quad (13)$$

Из полученных выражений можно выразить уравнение, подходящее для итерационного вычисления:

$$U_x^{j+1} = U_x^j - \frac{e^{U_x^j} + e^{U_x^j U_x - \frac{I_{x1}}{I_{x2}}}}{2e^{U_x^j} + e^{U_x^j U_x}}, \quad (14)$$

где j – номер итерации.

Из полученного уравнения, посредством последовательных приближений, находится U_x , после чего вычисляется напряжение U , соответствующее максимальной мощности массива СЭ. Подставив полученное значение напряжения в уравнение (8), вычисляется значение тока, соответствующее максимальной мощности, после чего, можно найти максимальную мощность установки из уравнения (3).

Уравнение (11) можно также численно решить, используя систему компьютерной алгебры (СКА) Mathcad Prime 3. Для этого необходимо ввести уравнение в программу с использованием логического оператора равенства, вставить оператор аналитического преобразования и ввести ключевое слово *solve* в местозаполнитель. Пример записи приведен в приложении А (Рисунок А.1).

Таким образом рабочий режим равномерно освещенного массива СЭ с последовательной коммутацией можно описать системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = IU_{\phi}, \\ U = \frac{n(AkT)}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} - \frac{I}{I_0} + 1 \right) - nIR_{\Pi}, \\ I = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{\phi} + IR_{\Pi})}{n(AkT)} \right) - 1 \right], \\ I_{\phi} = [I_{\text{кз(су)}} + K_i(T - T_{\text{су}})] \frac{\beta}{\beta_{\text{су}}}, \\ I_0 = \frac{I_{\phi}}{\exp \left[\frac{q[U_{\text{xx(су)}} + K_u(T - T_{\text{су}})]}{n(AkT)} \right] - 1}, \\ \frac{q(U_{\phi} + IR_{\Pi})}{n(AkT)} - \ln \left[\frac{I_{\phi} - I_0}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_{\phi} + IR_{\Pi})}{n(AkT)} \right)} \right] = 0, \\ T = T_{\text{oc}} + K_t \beta. \end{array} \right.$$

Достаточно удобным представляется нахождение точки максимальной мощности СФУ численным методом посредством СКА Mathcad Prime 3, используя блоки решения и функцию *minerr*. Такие блоки осуществляют поиск решения уравнений методом итераций, начиная с заданных значений начальных приближений. Преимуществом такого способа является то, что функции блока решения автоматически выбирают подходящий алгоритм для решения, а функция *minerr* применяет численный метод Левенберга-Марквардта, сочетающий в себе метод наискорейшего спуска и метод Ньютона [13]. Найденные решения являются аппроксимацией фактических решений, приемлемость которых определяется значениями допуска сходимости (TOL) и допуска ограничения (CTOL) [81]. В приложении А (Рисунок А.2) приведен снимок экрана блока решения СКА Mathcad Prime 3, вычисляющий параметры серийного фотоэлектрического модуля PS-250 в ТММ.

Достоверность вычислений была подтверждена экспериментами, результаты которого представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений параметров в ТММ фотоэлектрического модуля PS-250

Параметр	Расчетное значение	Экспериментальное значение
I	8,217	8,1
U	30,469	31
P	250,371	251,1
U_{xx}	38	39
$I_{кз}$	8,75	8,6

При неравномерном освещении массива СЭ, его характеристика образуется характеристиками групп СЭ, составляющих массив, включающие различно освещенные элементы (см. рисунок 19). Это происходит вследствие того, что параллельно отдельным группам СЭ включают шунтирующие диоды, которые отключают (шунтируют) группу, попавшую под обратное

напряжение смещения, т.е. затененную группу, не способную обеспечить ток нагрузки [107].

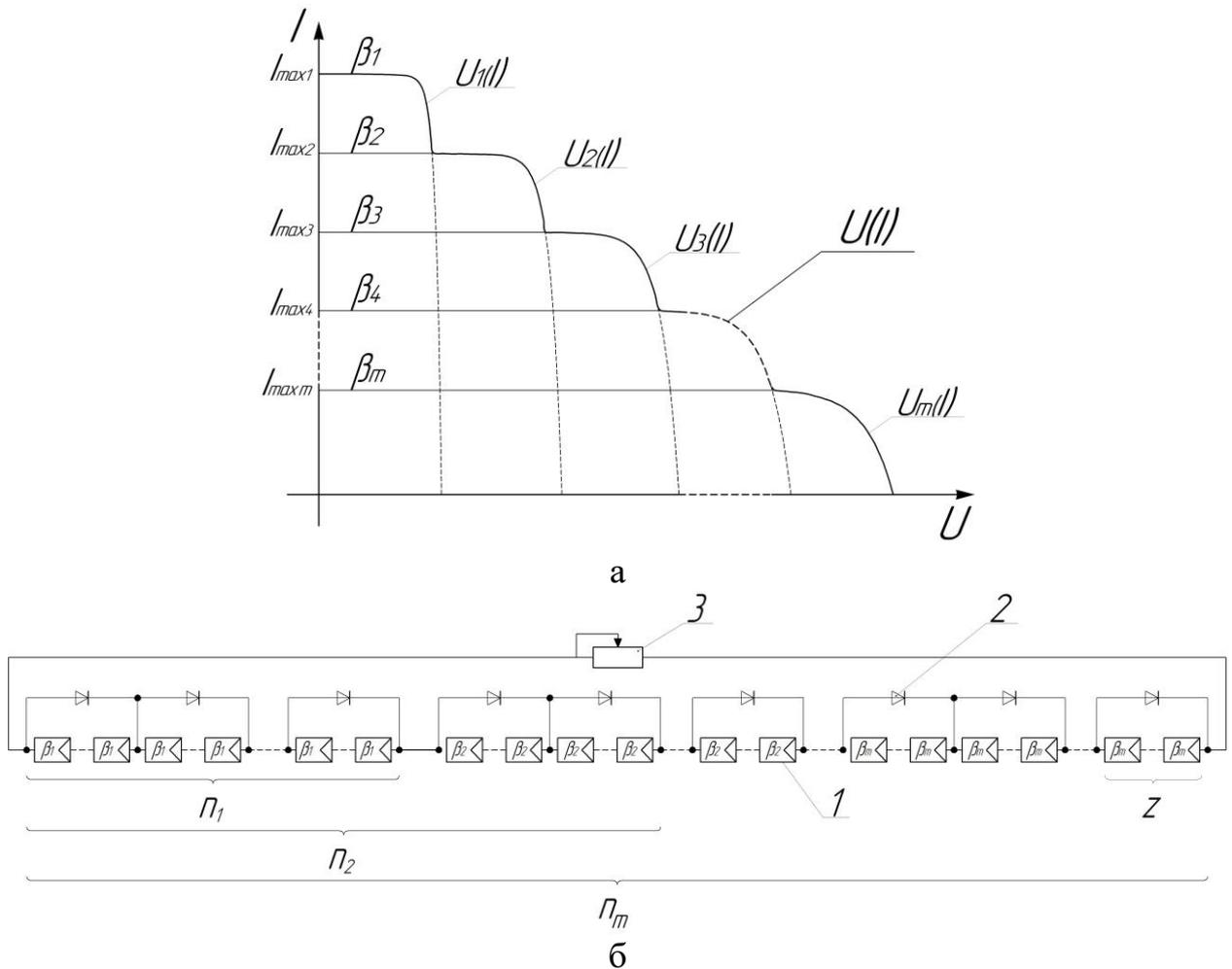


Рисунок 19 – Вольт-амперная характеристика неравномерно освещенного массива СЭ (а) и её структурная схема (б)
(1 – солнечный элемент; 2 – шунтирующий диод; 3 – нагрузка)

При шунтировании групп солнечных элементов диодами, необходимо учитывать падение напряжения на них, которое определяется соотношением:

$$U_{\text{д}} = \sum_{i=1}^p U_{\text{ди}}, \quad (15)$$

где p – количество групп солнечных элементов, шунтированное диодами;

$U_{\text{д}}$ – падение напряжения на шунтирующем диоде, (В).

Количество групп солнечных элементов, шунтированных диодами, можно вычислить из соотношения:

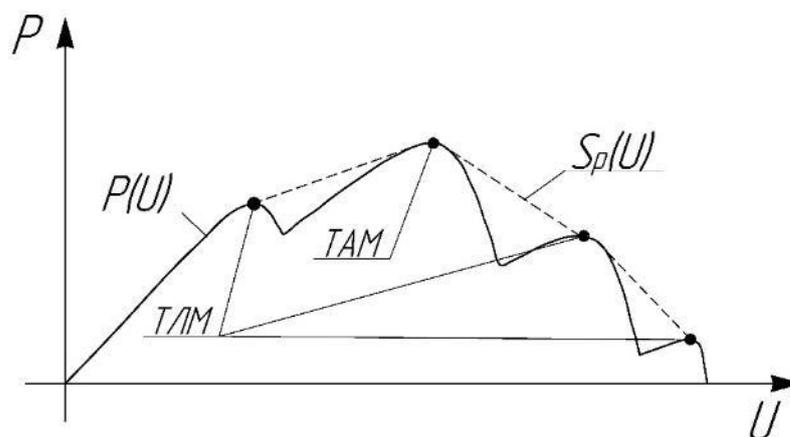


Рисунок 20 – Мощностная характеристика неравномерно освещенного массива солнечных элементов

Из рисунка видно, что ТАМ может приходиться на характеристику любой группы солнечных элементов, входящей в массив, в зависимости от интенсивности излучения в затененных областях и количества затеняемых элементов. Из этого следует, что большая часть алгоритмов определения точки максимальной мощности (возмущение и наблюдение, постоянного напряжения (тока), дополненной проводимости и др.) не способны определить ТАМ в таких условиях, устанавливая режим отбора электрической энергии находящийся вблизи, или соответствующий ТЛМ, что приводит к существенным потерям электрической энергии – алгоритмическим потерям, равным:

$$P_{\text{ПА}} = P_{\text{ТАМ}} - P_{\text{ТЛМ}}, \quad (19)$$

где $P_{\text{ТАМ}}$ – мощность в точке абсолютного максимума, (Вт);

$P_{\text{ТЛМ}}$ – мощность в точке локального максимума, (Вт).

Общие потери фотоэлектрической массива, в таком случае, будут равны:

$$P_{\text{П}} = P_{\text{З}} + P_{\text{ПА}} + P_{\text{Д}} = P_{\text{З}} + P_{\text{ТАМ}} - P_{\text{ТЛМ}} + P_{\text{Д}}, \quad (20)$$

где $P_{\text{З}}$ – мощность группы солнечных элементов, отключенной шунтирующими диодами, при равномерном освещении, определяемая уравнением (21), (Вт);

P_d – мощность, рассеиваемая на шунтирующих диодах, определяемая уравнением (22), (Вт).

$$P_3 = IU_3 = I \left[\frac{(n_m - n_x)(AKT)}{q} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_0} - \frac{I}{I_0} + 1 \right) - (n_m - n_x)IR_\Pi \right], \quad (21)$$

$$P_d = IU_d p = IU_d \left(\frac{n_m - n_1}{z} \right). \quad (22)$$

В случае верного определения точки максимальной мощности потери мощности будут равны:

$$P_\Pi = P_3 + P_d. \quad (23)$$

Снизить потери мощности и соответственно повысить энергетическую эффективность СФУ, работающей в условиях неравномерного освещения, возможно путем использования индивидуальных согласующих преобразователей [102]. Такие преобразователи устанавливаются в группы солнечных элементов, подверженные затенению, или повышенному освещению (в случае использования концентраторов) и позволяют передать от них максимально возможную электрическую мощность $P_{сп}$. В результате этого из уравнения (23) исключается P_d , а P_3 уменьшается на величину мощности $P_{сп}$. Таким образом это уравнение принимает вид:

$$P_\Pi = P_3 - P_{сп}. \quad (24)$$

Мощность $P_{сп}$ будет равна:

$$P_{сп} = I \sum_{i=1}^p U_{сп i}, \quad (25)$$

где $U_{сп}$ – напряжение на выходе индивидуального согласующего преобразователя, (В), равное:

$$U_{сп} = \frac{U_{вх сп} I_{вх сп}}{I} \eta_{сп}, \quad (26)$$

где $U_{вх сп}$ – напряжение на входе индивидуального согласующего преобразователя, (В);

$I_{вх сп}$ – ток на входе индивидуального согласующего преобразователя, (А);

$\eta_{\text{СП}}$ – КПД индивидуального согласующего преобразователя.

Напряжение $U_{\text{ВХ СП}}$ и ток $I_{\text{ВХ СП}}$ соответствующие точке максимальной мощности группы солнечных элементов к которой подключен индивидуальный согласующий преобразователь, вычисляются согласно (8) и (11).

Из уравнений (25) и (26) следует, что при любых значениях тока I массива, мощность на выходе индивидуального согласующего преобразователя постоянна:

$$P_{\text{СП}} = \sum_i^p (U_{\text{ВХ СП}} I_{\text{ВХ СП}} \eta_{\text{СП}})_i = I \cdot \sum_{i=1}^p U_{\text{СП } i} = \text{const.} \quad (27)$$

Что подтверждается его выходной вольт-амперной характеристикой $U_{\text{СП}}(I)$, представленной на рисунке 21:

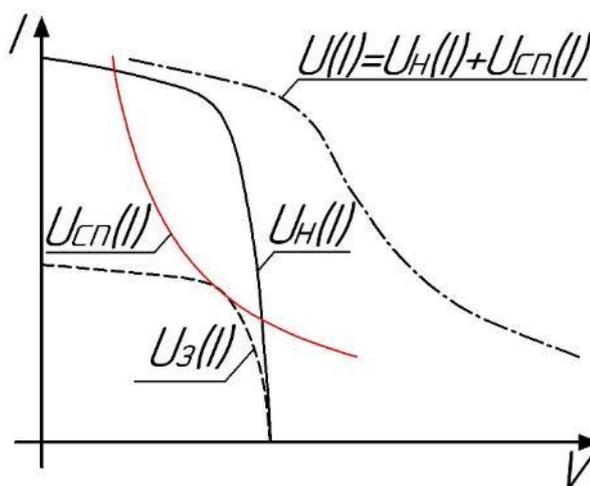


Рисунок 21 – Вольт-амперная характеристика группы солнечных элементов с использованием индивидуального согласующего преобразователя

Из характеристики видно, что ток (I), может принимать значения как выше, так и ниже значения тока в точке максимальной мощности характеристики группы солнечных элементов подключенной ко входу индивидуального согласующего преобразователя. Таким образом, при любом значении тока массива, ток на выходе индивидуального согласующего преобразователя ($I_{\text{СП}}$) способен принимать такое же значение $I = I_{\text{СП}}$. Следовательно, группа СЭ с таким преобразователем способна передать электрическую энергию при любой освещенности - затенении, загрязнении,

или повышенной освещенности (например, при работе совместно с солнечными концентраторами).

Рабочая точка преобразователя характеризуется, решением системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\Pi} = P - (P_3 - P_{\text{СП}}), \\ P_{\text{СП}} = \sum_i^p (U_{\text{ВХ СП}} I_{\text{ВХ СП}} \eta_{\text{СП}})_i = I \sum_{i=1}^p U_{\text{СП } i}, \\ U_{\text{СП}} = \frac{U_{\text{ВХ СП}} I_{\text{ВХ СП}}}{I} \eta_{\text{СП}}, \\ I_{\text{ВХ СП}} = I_{\Phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{\text{ВХ СП}} + I_{\text{ВХ СП}} R_{\Pi})}{n_{\text{ВХ}} (AkT)} \right) - 1 \right], \\ \frac{q(U_{\text{ВХ СП}} + I_{\text{ВХ СП}} R_{\Pi})}{n_{\text{ВХ}} (AkT)} - \ln \left[\frac{I_{\Phi} - I_0}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_{\text{ВХ СП}} + I_{\text{ВХ СП}} R_{\Pi})}{n_{\text{ВХ}} (AkT)} \right)} \right] = 0, \\ I_{\Phi} = [I_{\text{кз(су)}} + K_i (T - T_{\text{су}})] \frac{\beta_{\text{ВХ}}}{\beta_{\text{су}}}, \end{array} \right.$$

где $n_{\text{ВХ}}$ – количество солнечных элементов на входе индивидуального согласующего преобразователя;

$\beta_{\text{ВХ}}$ – интенсивность солнечного излучения, наименее освещённого солнечного элемента на входе индивидуального согласующего преобразователя, (Вт/м²);

$I = I_{\text{СП}}$ – ток в массиве СЭ и на выходе индивидуального согласующего преобразователя, (А).

Если в массиве группа солнечных элементов, имеющая неравномерное освещение, передает электрическую энергию через индивидуальные согласующие преобразователи, а остальная нормально освещенная группа таких не имеет, то характеристика такого массива будет образована суммой характеристик каждой группы относительно напряжения:

$$U(I) = U_{\text{Н}}(I) + U_{\text{СП}}(I), \quad (28)$$

где $U_{\text{Н}}(I)$ – характеристика нормально освещенной группы солнечных элементов;

$U_{\text{СП}}(I)$ – характеристика индивидуального согласующего преобразователя.

На рисунке 21 изображена характеристика такого массива для случая, когда группа солнечных элементов с установленными индивидуальными согласующими преобразователями $U_{\text{сп}}(I)$, имеет затенение.

Вследствие того, что индивидуальный согласующий преобразователь производит отбор электрической энергии в точке максимальной мощности от подключенной к его входу группы солнечных элементов, при различных выходных значениях тока, точка максимальной мощности массива будет определяться значением тока в точке максимальной мощности всей СФУ, передающей энергию без использования преобразователей ($I_{(\text{ТММ})} = I_{\text{сп}} = I_{\text{н}(\text{ТММ})}$). Отсюда следует, что рабочий режим такой СФУ можно описать системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{(\text{ТММ})} = I_{(\text{ТММ})} U_{(\text{ТММ})}, \\ I_{(\text{ТММ})} = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{(\text{ТММ})} + I_{(\text{ТММ})} R_{\Pi})}{(n - n_{\text{ВХ}})(AkT)} \right) - 1 \right], \\ U_{(\text{ТММ})} = U_{\text{н}(\text{ТММ})} + U_{\text{сп}}, \\ \frac{q(U_{\text{н}(\text{ТММ})} + IR_{\Pi})}{(n - n_{\text{ВХ}})(AkT)} - \ln \left[\frac{I_{\phi} - I_0}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_{\text{н}(\text{ТММ})} + IR_{\Pi})}{(n - n_{\text{ВХ}})(AkT)} \right)} \right] = 0, \\ U_{\text{сп}} = \frac{U_{\text{ВХ сп}} I_{\text{ВХ сп}}}{I_{(\text{ТММ})}} \eta_{\text{сп}}, \\ I_{\text{ВХ сп}} = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{\text{ВХ сп}} + I_{\text{ВХ сп}} R_{\Pi})}{n_{\text{ВХ}}(AkT)} \right) - 1 \right]. \end{array} \right.$$

На рисунке 22 представлены электрические характеристики, полученные при помощи математической модели и в результате эксперимента в котором были использованы два фотоэлектрических модуля KV-260M и серийно выпускаемые согласующие преобразователи Tigo «Module Maximizer»:

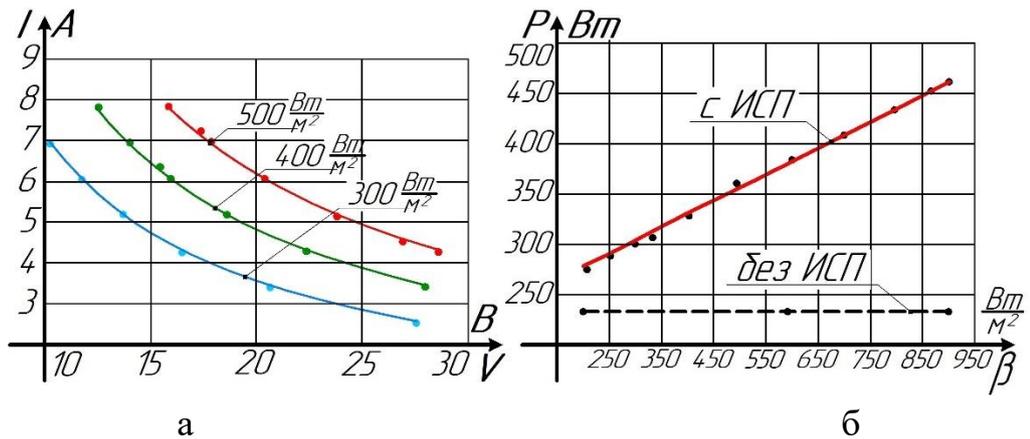


Рисунок 22 – Результаты моделирования работы массива СЭ с индивидуальными согласующими преобразователями
 а – ВАХ согласующего преобразователя при различных значениях интенсивности излучения; б – зависимость выходной мощности массива от интенсивности излучения одного из модулей (точками показаны результаты экспериментальных измерений)

Сравнение полученных данных свидетельствует о достаточно высокой точности моделирования. Отклонения значений выходной мощности массива не превышают 2,3 %.

2.3 Теоретический анализ физических процессов в СФУ, работающих в условиях равномерного и неравномерного освещения при параллельной и смешанной коммутации СЭ

Параллельная коммутация солнечных элементов в батарею представлена на рисунке 23:

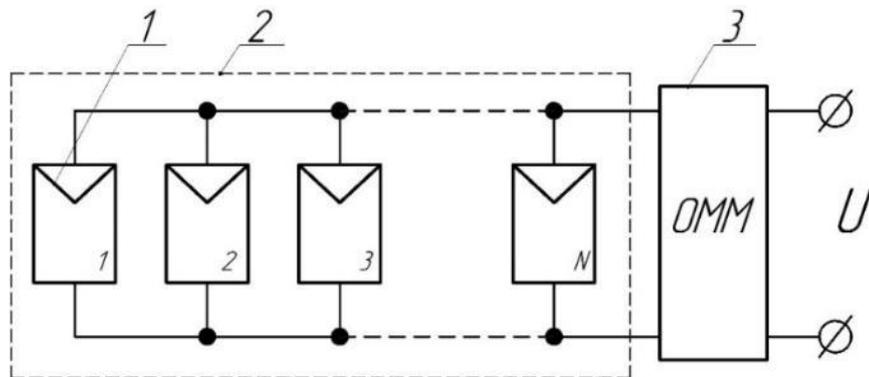


Рисунок 23 - Установка с параллельно соединёнными солнечными элементами в батарею

(1 – солнечный элемент, 2 – батарея солнечных элементов, 3 – устройство поиска точки максимальной мощности и оптимизации выходной мощности)

Вольт-амперная характеристика равномерно освещенной батареи в первом квадранте описывается согласно уравнению (2), с учетом того, что ток на выходе батареи будет равен сумме токов каждого солнечного элемента ($I = \sum_{i=1}^n I_i$), а напряжение будет равно напряжению на выходе каждого солнечного элемента ($U = U_1 = U_2 = \dots = U_n = const$):

$$I = n_{\text{пр}} \left[I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_{\text{п}})}{AkT} \right) - 1 \right] \right], \quad (29)$$

где $n_{\text{пр}}$ – количество параллельно соединенных солнечных элементов в батарее.

Максимальная мощность такой батареи будет определяться уравнением:

$$\begin{aligned} P_{\text{max}} &= U_{\text{max}} I_{\text{max}} = U_{\text{max}} \sum_{i=1}^n I_i = \\ &= U_{\text{max}} n_{\text{пр}} \left[I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{\text{max}} + IR_{\text{п}})}{AkT} \right) - 1 \right] \right], \end{aligned} \quad (30)$$

где P_{max} – максимальная мощность батареи солнечных элементов с параллельной коммутацией, (Вт);

U_{max} – напряжение батареи в точке максимальной мощности, (В);

I_{max} – ток батареи в точке максимальной мощности (А);

I_i – ток i -го солнечного элемента, (А).

Можно предположить, что при неравномерном освещении солнечных элементов с одинаковой температурой, максимальная мощность батареи уменьшится на величину снижения максимальной мощности отдельных элементов, вследствие их затенения. Однако это происходит несколько иначе из-за того, что напряжения солнечных элементов в точках максимальной мощности (ТММ) не одинаковы при различных освещенностях, как показано на рисунке 24:

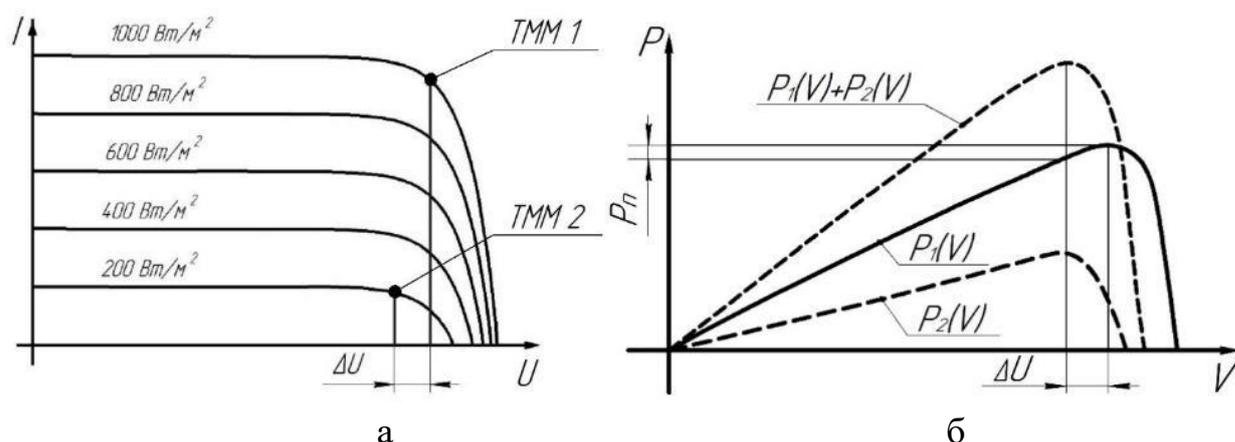


Рисунок 24 - Вольт-амперные характеристики солнечных элементов при разной освещенности

Вследствие различного напряжения, отбор электрической энергии от батареи не представляется возможным в точке максимальной мощности каждого солнечного элемента. Значение этой разницы можно найти из уравнения (29), решив его относительно напряжения для каждой из точек:

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= U_{max1} - U_{max2} = \\
 &= \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi1}}{I_{01}} - \frac{I_{max1}}{I_{01}} + 1 \right) - I_{max1} R_{\Pi} - \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi2}}{I_{02}} - \frac{I_{max2}}{I_{02}} + 1 \right) - I_{max2} R_{\Pi} = \\
 &= \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{(I_{\phi1} - I_{max1} + I_{01}) I_{02}}{(I_{\phi2} - I_{max2} + I_{02}) I_{01}} \right) - R_{\Pi} (I_{max1} + I_{max2}) \approx \\
 &\approx \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{(I_{\phi1} - I_{max1}) I_{02}}{(I_{\phi2} - I_{max2}) I_{01}} \right) - R_{\Pi} (I_{max1} + I_{max2}),
 \end{aligned} \tag{31}$$

где U_{max1}, U_{max2} – напряжения в ТММ элемента 1 и элемента 2, (В);

$I_{\phi1}, I_{\phi2}$ – фототок элемента 1 и элемента 2, (А);

I_{max1}, I_{max2} – токи нагрузки элемента 1 и элемента 2 в ТММ, (А);

I_{01}, I_{02} – обратные токи насыщения элемента 1 и элемента 2, (А).

Анализ характеристики такой батареи показывает, что напряжение в ТАМ будет с некоторым допущением соответствовать напряжению в точке максимальной мощности затененного элемента в диапазоне расхождений интенсивностей излучения от 10 до 100 %. Из этого следует, что в таком случае мощность элемента с большим значением освещенности (элемент 1) будет ограничена менее освещенным элементом (элемент 2) (см. рисунок 24б). Потери мощности при этом, составят:

$$P_{\Pi} = P_{max1} - P_1 = I_{max1}U_{max1} - I_1U_{max2}, \quad (32)$$

где P_{max1} – мощность элемента 1 в ТММ, (Вт);

P_1 – мощность элемента 1 при параллельном соединении с элементом 2, (Вт);

I_1 – ток элемента 1 при параллельном соединении с элементом 2, (А).

Подставив в уравнение (32) соответствующие значения токов получим:

$$P_{\Pi} = \left[I_{\phi1} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(U_{max1} + I_{max1}R_{\Pi})}{AkT} \right) - 1 \right] \right] U_{max1} - \left[I_{\phi1} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q((U_{max1} - \Delta U) + I_{max1}R_{\Pi})}{AkT} \right) - 1 \right] \right] U_{max2}. \quad (33)$$

На рисунке 25 изображен график зависимости потерь мощности (P_{Π}) солнечного элемента «КВАЗАР» серии К6М освещенного солнечным излучением интенсивностью $\beta=1000$ Вт/м², при параллельном подключении к нему элемента с освещенностью - $(0,1 \dots 1) \beta$, от освещенности ($P_{\Pi}(\beta), \Delta U(\beta)$):

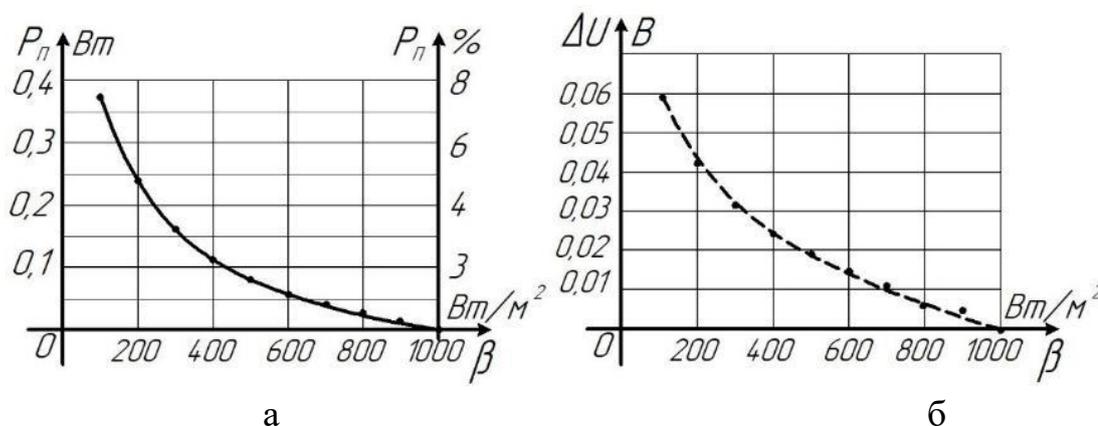


Рисунок 25 – Графики зависимости потерь мощности (а) и разницы напряжений (б) солнечного элемента от интенсивности излучения (точками показаны результаты экспериментальных измерений)

Из графиков видно, что в таком случае солнечный элемент, имеющий нормальную освещенность, теряет до 7,4 % мощности в зависимости от освещенности затененного солнечного элемента, что может быть существенным при смешанной коммутации, как будет показано ниже.

Смешанная коммутация солнечных элементов представлена на рисунке 26:

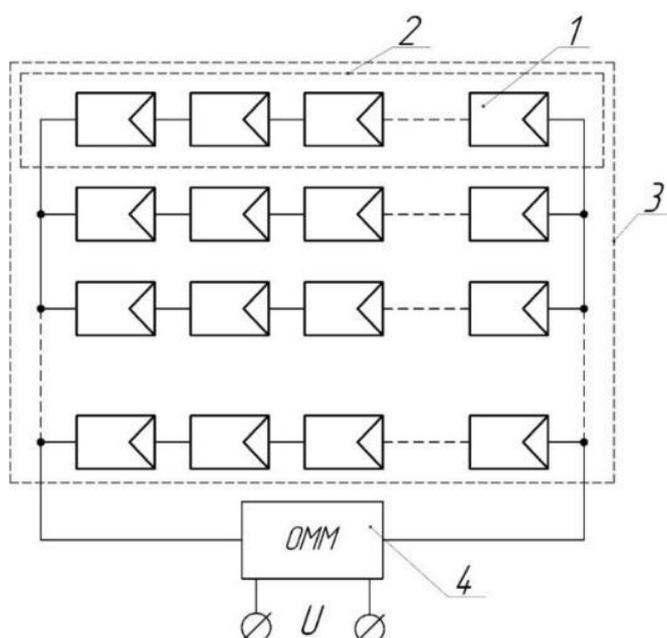


Рисунок 26 - Смешанная коммутация солнечных элементов
(1 – солнечный элемент; 2 – массив солнечных элементов; 3 – батарея солнечных элементов; 4 - устройство поиска точки максимальной мощности и оптимизации выходной мощности)

При такой коммутации, ток батареи, складывается из токов каждого массива СЭ ($I = \sum_{i=1}^n I_i$), а напряжение будет равно напряжению на выходе каждого такого массива, которое, в свою очередь, будет складываться из напряжений каждого элемента, входящего в этот массив ($U = \sum_{i=1}^n U_i$). Таким образом вольт-амперная характеристика, при равномерном освещении, будет описываться уравнением:

$$I = n_{\text{пр}} \left[I_{\Phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_{\text{п}})}{n_{\text{пс}}(AKT)} \right) - 1 \right] \right], \quad (34)$$

При неравномерном освещении батареи со смешанным соединением солнечных элементов, снижение энерговыработки происходит по причинам, которые возникают при последовательной и параллельной коммутации, но с некоторыми особенностями. Эти особенности связаны с тем, что при изменении ТММ любого из параллельно соединённых массивов, становится не возможным отбор максимальной мощности от каждой группы из-за разницы напряжений (ΔU), приводящей к снижению мощности батареи на величину, превышающую величину снижения максимальной мощности

отдельных групп, вследствие их затенения. При этом снижение мощности происходит по-разному в зависимости от характера затенения – равномерного и неравномерного (рисунок 27).

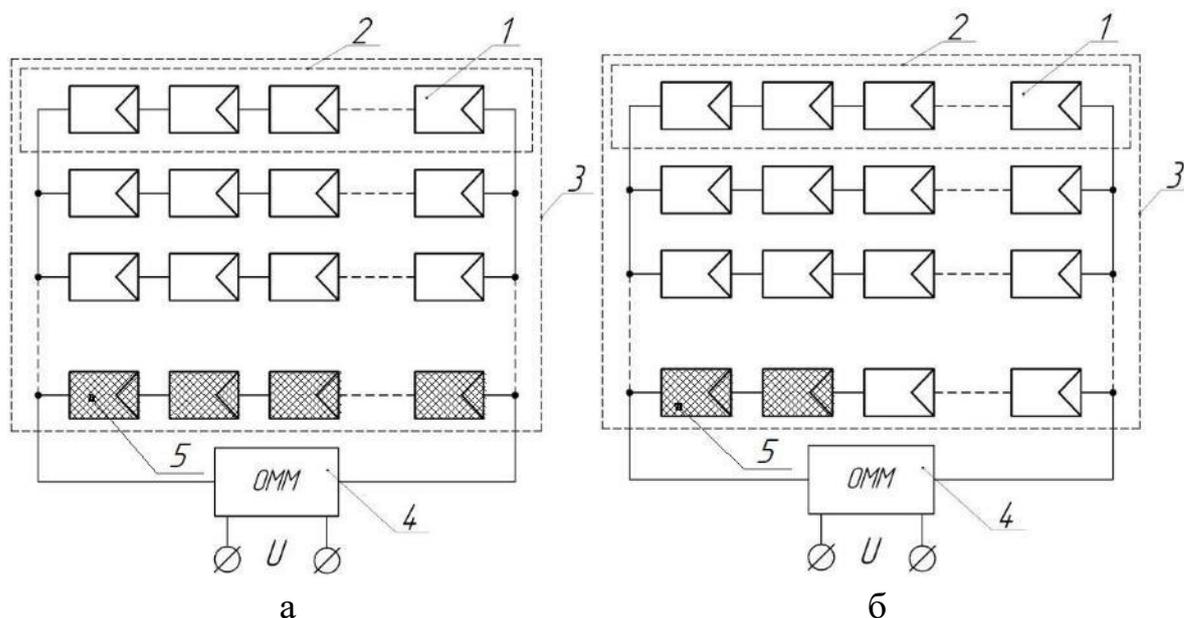


Рисунок 27 – СФУ со смешанной коммутацией при
 а – равномерном затенении; б – неравномерном затенении
 (1 – нормально освещенные СЭ; 2 – массив СЭ; 3 – фотоэлектрическая
 батарея; 4 - устройство поиска ТММ и оптимизации выходной мощности
 (ОММ); 5 - затененные СЭ)

При равномерном затенении группы солнечных элементов, снижение мощности всей батареи ($P_{пб}$) будет складываться из потери мощности, вызванной уменьшением освещенности затененных групп (P_3), и потери мощности, вызванной различием значений напряжений в ТММ освещенных и затененных массивов СЭ ($P_{\Delta U}$):

$$P_{пб} = P_3 + P_{\Delta U} = n_{пр3}(P_{ТММ1} - P_{ТММ2}) + P_{\Delta U}, \quad (35)$$

где $P_{ТММ1}$ – максимальная мощность нормально освещенного массива СЭ, (Вт);
 $P_{ТММ2}$ – мощность батареи СЭ с равномерным частичным затенением, (Вт).

Значение потерь мощности, вызванной различием напряжений можно вычислить из соотношения:

$$P_{\Delta U} = U_{1max} \sum_{i=1}^{n_{пр}} I_{1max i} - U_{2max} \sum_{i=1}^{n_{пр}} I_{2max i}, \quad (36)$$

где $n_{пр}$ – количество параллельно соединенных массивов СЭ;

U_{1max}, U_{2max} – значения напряжений в ТММ параллельно соединенных массивов СЭ, работающих без затенения и с затенением, (В);

I_{1max}, I_{2max} – значения токов в ТММ массивов СЭ без затенения и с затенением, (А).

Значение суммы токов для массивов без затенения можно определить из соотношения (34), подставляя значение напряжения, соответствующее ТММ батареи (U_{1max}). Это значение напряжения, с учетом того, что оно характеризует точку экстремума кривой мощности батареи, можно вычислить из уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{1max}}{dU_{1max}} &= I_{1max} + U_{1max} \frac{dI_{1max}}{dU_{1max}} = \\ &= n_{пр} \left[I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{п})}{n_{пс}(AkT)} \right) - 1 \right] \right] - \\ & - \frac{n_{пр}q(U_{1max} + I_{1max}R_{п})I_0 \exp \left(\frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{п})}{n_{пс}(AkT)} \right)}{n_{пс}(AkT)} = 0, \end{aligned} \quad (37')$$

или:

$$\frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{п})}{n_{пс}(AkT)} - \ln \frac{I_0 + I_{\phi}}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{п})}{n_{пс}(AkT)} \right)} = 0. \quad (37)$$

Значение напряжения массива, имеющего равномерное частичное затенение, в случае верного определения ТММ (ТАМ) алгоритмом поиска ТММ, будет определяться точкой глобального экстремума кривой мощности - уравнение (38), а в случае неверного (ТЛМ) – уравнением (37).

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dU_{2max}} &= n_{\text{прз}} \left[I_{\phiз} - I_{0з} \left[\exp \left(\frac{q(U_{2max} + I_{2max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) - 1 \right] \right] - \\
&- U_{2max} \left[n_{\text{прз}} I_{0з} \frac{q(U_{2max} + I_{2max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \exp \left(\frac{q(U_{2max} + I_{2max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) \right. \\
&+ n_{\text{про}} I_{0о} \frac{q(U_{2max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \exp \left(\frac{q(U_{2max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) \left. \right] + \\
&+ n_{\text{про}} \left[I_{\phiо} - I_{0о} \left[\exp \left(\frac{q(U_{2max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) - 1 \right] \right] \approx \\
&\approx n_{\text{прз}} I_{\phiз} + n_{\text{про}} I_{0о} - \exp \left(\frac{q(U_{2max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) \times \\
&\times \left(\frac{q}{n_{\text{пс}}(AkT)} \left(n_{\text{прз}} I_{0з} (U_{2max} + I_{2max}R_{\Pi}) + n_{\text{про}} I_{0о} (U_{2max} + I_{1max}R_{\Pi}) \right) \right) = 0,
\end{aligned} \tag{38}$$

где $n_{\text{прз}}$ – количество массивов СЭ, имеющих затенение;

$n_{\text{про}}$ – количество массивов СЭ, имеющих нормальное освещение;

$I_{\phiз}$ – фототок СЭ затененного массива, (А);

$I_{\phiо}$ – фототок СЭ освещенного массива, (А);

I'_1 – значение тока массива не имеющего затенения при напряжении U_{2max} , (А).

Таким образом, суммарные потери мощности батареи при равномерном затенении групп солнечных элементов и верном определении точки максимальной мощности характеризуется системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}
P_{\text{пб}} &= U_{1max} n_{\text{пр}} \left[I_{\phiо} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) - 1 \right] \right] - U_{2max} \times \\
&\times \left[n_{\text{прз}} \left[I_{\phiз} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{2max} + I_{2max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) - 1 \right] \right] + n_{\text{про}} \left[I_{\phiо} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) - 1 \right] \right] \right], \\
\frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} - \ln \frac{I_0 + I_{\phi}}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_{1max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right)} &= 0, \\
n_{\text{прз}} I_{\phiз} + n_{\text{про}} I_{0о} - \exp \left(\frac{q(U_{2max} + I_{1max}R_{\Pi})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right) \times \\
&\times \left(\frac{q}{n_{\text{пс}}(AkT)} \left(n_{\text{прз}} I_{0з} (U_{2max} + I_{2max}R_{\Pi}) + n_{\text{про}} I_{0о} (U_{2max} + I_{1max}R_{\Pi}) \right) \right) &= 0.
\end{aligned} \right.$$

Значение напряжения рассогласования можно вычислить из соотношения:

$$\Delta U = U_{1max} - U_{2max}, \quad (39)$$

а потери, возникающие от несогласованности по напряжению, согласно преобразованному уравнению (35):

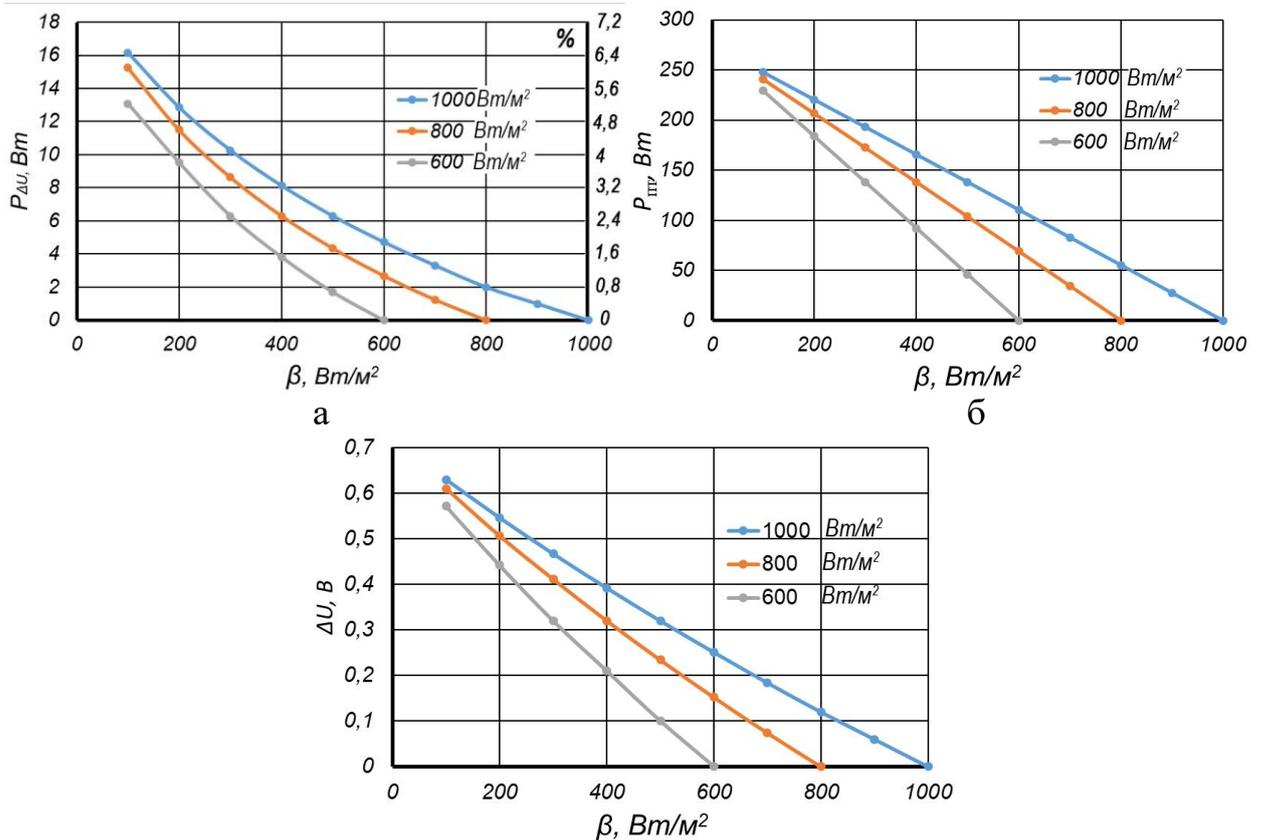
$$P_{\Delta U} = P_{пб} - n_{прз}(P_{тмм1} - P_{тмм2}), \quad (35')$$

где

$$P_{тмм1} = U_{1max}I_{1max}, \quad (40')$$

$$P_{тмм2} = U_{2max}I_{2max}. \quad (40'')$$

На рисунке 28 изображены графики потерь мощности и напряжения рассогласования СФУ, состоящей из 3-х серийных фотоэлектрических модулей PS-250, с равномерно затененным одним из модулей, при верном определении точки максимальной мощности (установке ОММ в ТАМ):



в

Рисунок 28 – Графики зависимости потерь СФУ со смешанной коммутацией СЭ при равномерном частичном затенении от интенсивности излучения в тени и установке ОММ в ТАМ при различной освещенности (а – потери от несогласованности по напряжению, б – суммарные потери от затенения, в – значение напряжения рассогласования)

А на рисунке 29 изображены графики потерь мощности и напряжения рассогласования СФУ, состоящей из 3-х серийных фотоэлектрических модулей PS-250, с равномерно затененным одним из модулей, при неверном определении точки максимальной мощности (установке ОММ в ТЛМ):

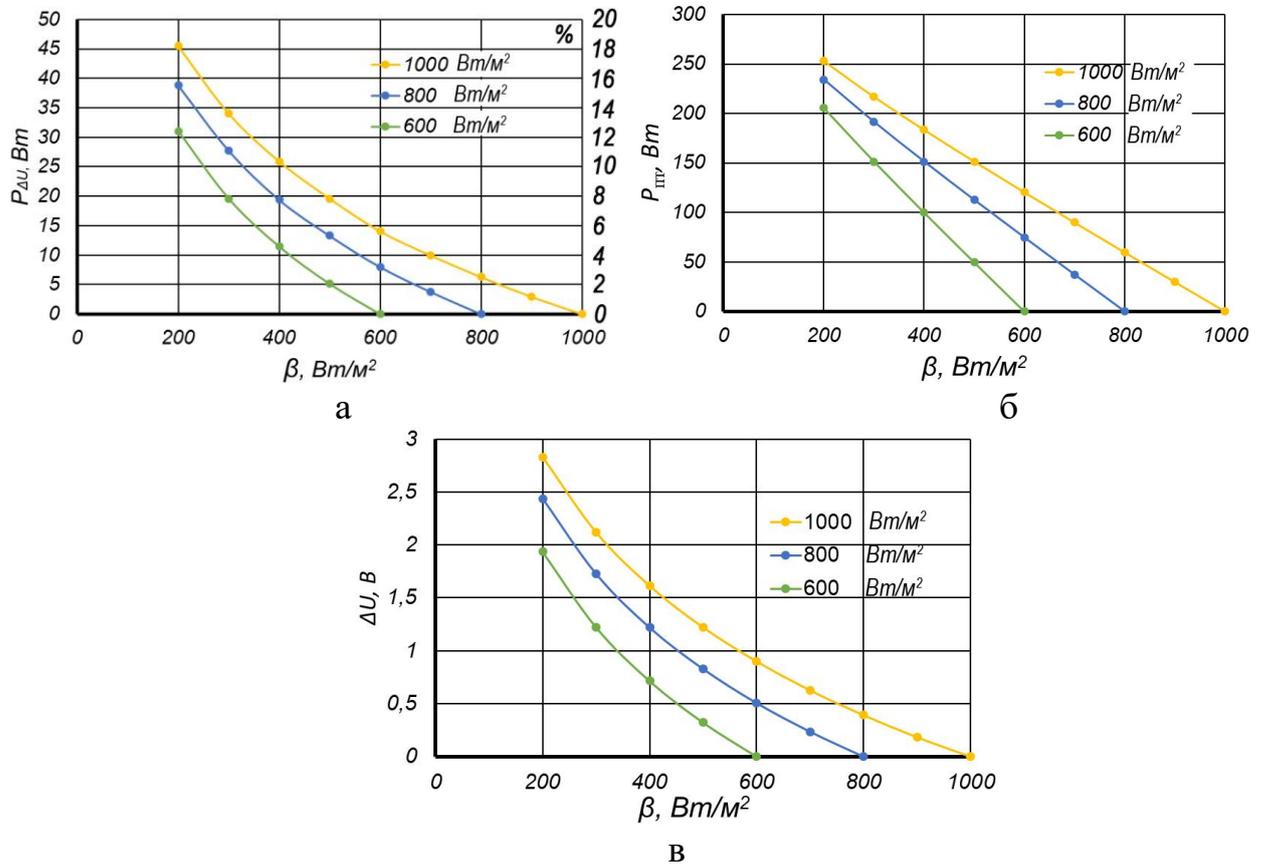


Рисунок 29 – Графики зависимости потерь СФУ со смешанной коммутацией при равномерном частичном затенении от интенсивности излучения в тени и установке ОММ в ТЛМ при различной освещенности (а – потери от несогласованности по напряжению, б – суммарные потери от затенения, в – значение напряжения рассогласования)

В случае неравномерного затенения группы солнечных элементов, снижение мощности всей батареи ($P_{пб}$), также как и при равномерном затенении, будет состоять из потери мощности вызванной уменьшением освещенности затененных групп (P_3) и потери мощности вызванной различием значений напряжений в ТММ освещенных и затененных групп ($P_{\Delta U}$). При этом различие значений напряжений будет более существенно и, соответственно, потери, вызванные этим различием, будут больше, чем в

случае равномерного затенения. Это происходит из-за отключения части солнечных элементов шунтирующими диодами, как было показано ранее.

Таким образом, напряжение рассогласования, с учетом уравнения (38), можно вычислить из выражения:

$$\Delta U = U_{1max} - U'_{2max} = p(U_n + U_D), \quad (41)$$

где U_n – напряжение группы солнечных элементов с параллельно включённым шунтирующим диодом при нормальной освещенности.

Суммарные потери мощности батареи можно вычислить из соотношения:

$$P_{пб} = U_{1max} n_{пр} I_{1max} - U'_{2max} (n_{пр о} I_{1max} + n_{пр з} I'_{2max}), \quad (42)$$

где U'_{2max} – напряжение в ТММ параллельно соединенного массива СЭ с частичным затенением, (В);

I'_{2max} – ток в ТММ параллельно соединенного массива СЭ с частичным затенением, (А).

Напряжение U'_{2max} , в случае определения ТАМ алгоритмом поиска ТММ можно вычислить как точку экстремума функции мощности батареи от напряжения $P_6(U)$:

$$\begin{aligned} \frac{dP_6}{dU'_{2max}} = & n_{пр з} \left(I_\phi - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_2 R_{п} + U_D)}{n_{пс з} (AkT)} \right) - 1 \right] \right) - \\ & - U'_{2max} \left(\frac{q I_0 n_з \exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_2 R_{п} + U_D)}{n_{пс з} (AkT)} \right)}{n_{пс з} (AkT)} + \frac{q I_0 n_з \exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_1 R_{п})}{n_{пс} (AkT)} \right)}{n_{пс} (AkT)} \right) + \\ & + n_{пр о} \left(I_\phi - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_1 R_{п})}{n_{пс} (AkT)} \right) - 1 \right] \right) \approx \end{aligned} \quad (43)$$

$$\approx I_\phi (n_{пр з} + n_{пр о}) - \frac{U'_{2max} q I_0}{AkT} \left(\frac{n_{пр з} \exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_2 R_{п} + U_D)}{n_{пс з} (AkT)} \right)}{n_{пс з}} + \frac{n_{пр о} \exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_1 R_{п})}{n_{пс} (AkT)} \right)}{n_{пс}} \right) = 0,$$

где $n_{пс}$ – количество последовательно соединенных солнечных элементов в группе;

$n_{\text{псз}}$ – количество не шунтированных солнечных элементов в группе с затенением, равно:

$$n_{\text{псз}} = n_{\text{пс}} - \frac{\Delta U}{U_{\text{мм}}}, \quad (44)$$

где $U_{\text{мм}}$ – напряжение солнечного элемента в ТММ.

Таким образом суммарные потери мощности батареи при неравномерном затенении групп солнечных элементов и верном определении точки максимальной мощности (ТАМ) характеризуется системой уравнений:

$$\left[\begin{array}{l} P_{\text{пб}} = U_{1\text{max}} n_{\text{пр}} I_{1\text{max}} - U'_{2\text{max}} (n_{\text{пр0}} I'_{1} + n_{\text{прз}} I'_{2}), \\ P_{\Delta U} = P_{\text{пб}} - pP, \\ P = U_n I_{1\text{max}}, \\ I_{1\text{max}} = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{1\text{max}} + I_{1\text{max}} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс0}} (AkT)} \right) - 1 \right], \\ I_{\phi} (n_{\text{прз}} + n_{\text{пр0}}) - \\ - \frac{U'_{2\text{max}} q I_0}{AkT} \left(\frac{n_{\text{прз}} \exp \left(\frac{q(U'_{2\text{max}} + I'_{2} R_{\text{п}} + U_{\text{д}})}{n_{\text{псз}} (AkT)} \right)}{n_{\text{псз}}} + \frac{n_{\text{пр0}} \exp \left(\frac{q(U'_{2\text{max}} + I'_{1} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс}} (AkT)} \right)}{n_{\text{пс}}} \right) = 0, \text{ при } U'_2 < U_{2\text{max}}, \\ U'_{2\text{max}} = U_{1\text{max}}, \text{ при } U'_2 \geq U_{2\text{max}}, \\ \frac{q(U_{1\text{max}} + I_{1\text{max}} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс}} (AkT)} - \ln \frac{I_0 + I_{\phi}}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_{1\text{max}} + I_{1\text{max}} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс}} (AkT)} \right)} = 0, \\ I'_{1} = I_{\phi} - I_0 \exp \left(\frac{q(U'_{2\text{max}} + I'_{1} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс0}} (AkT)} \right), \\ I'_{2} = n_{\text{прз}} \left(I_{\phi} - I_0 \exp \left(\frac{q(U'_{2\text{max}} + I'_{2} R_{\text{п}} + U_{\text{д}})}{n_{\text{псз}} (AkT)} \right) \right), \text{ при } U'_2 < U_{2\text{max}}, \\ I'_{2} = n_{\text{прз}} \left(I'_{\phi} - I'_{0} \exp \left(\frac{q(U'_{2\text{max}} + I'_{2} R_{\text{п}} + U_{\text{д}})}{n_{\text{пс0}} (AkT)} \right) \right), \text{ при } U'_2 \geq U_{2\text{max}}, \end{array} \right.$$

где I'_{1} и I'_{2} – токи в параллельно соединенных группах без затенения и с затенением при напряжении батареи $U'_{2\text{max}}$, (А);

I'_{ϕ} – фототок группы солнечных элементов при освещенности, равной освещенности в области частичного затенения, (А);

I'_{0} – обратный ток насыщения группы солнечных элементов при освещенности, равной освещенности в области частичного затенения, (А).

На рисунке 30 изображены графики потерь мощности ($P_{\text{пб}}$ и $P_{\Delta U}$) и выходного напряжения ($U'_{2\text{max}}$) фотоэлектрической батареи мощностью 7,5

кВт, состоящей из 3-х параллельно соединенных массивов СЭ, состоящих из последовательно соединенных 10-ти модулей PS-250, с поочередным частичным затенением (интенсивность солнечного излучения в тени 50 Вт/м^2) модулей в одном из массивов, при определении ТАМ алгоритмом поиска ТММ, полученных в результате моделирования при стандартных условиях:

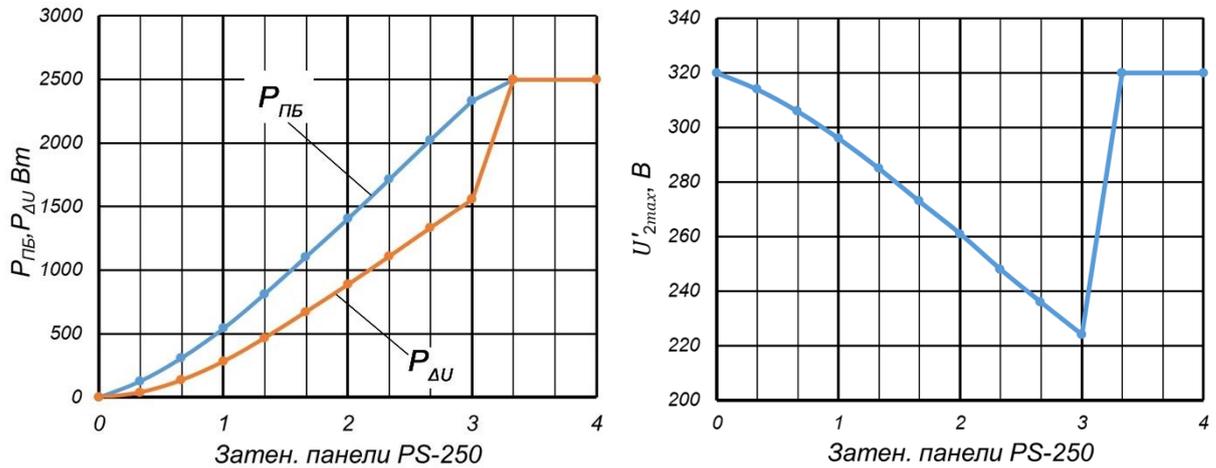


Рисунок 30 – Графики зависимости потерь мощности и выходного напряжения фотоэлектрической батареи мощностью 7,5 кВт от частичного затенения фотоэлектрических модулей одного из параллельно соединенных массивов

А на рисунке 31 изображены графики потерь мощности и выходного напряжения для батареи мощностью 30 кВт, состоящей из 12-ти параллельно соединенных массивов СЭ, состоящих из 10-ти последовательно соединенных фотоэлектрических модулей PS-250 при тех же условиях:

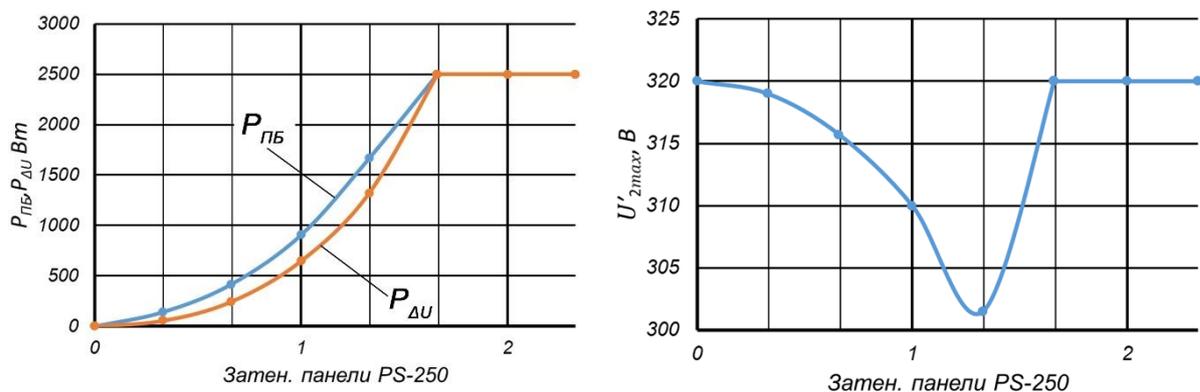


Рисунок 31 – Графики зависимости потерь мощности и выходного напряжения фотоэлектрической батареи мощностью 30 кВт от частичного затенения фотоэлектрических модулей одного из параллельно соединенных массивов

Из графиков видно, что при неравномерном частичном затенении фотоэлектрических модулей, мощность массива снижается значительно больше от рассогласованности по напряжению, чем от непосредственного снижения освещенности затенённых модулей. На примере СФУ мощностью 30 кВт, видно, что частичное затенение одного модуля приводит к снижению мощности массива почти на 40%, а затенение более одного практически не позволяет вырабатывать электрическую энергию массиву, имеющему затенение.

В случае установки режима отбора от батареи в первой ТЛМ от точки холостого хода (ТХХ), напряжение U'_{2max} будет равно напряжению U_{1max} ($U'_{2max} = U_{1max}$). Эти напряжения будут также равны в случае, когда напряжение параллельного массива с шунтированными группами СЭ будет меньше напряжения в ТММ массива не имеющего затенения ($U'_2 < U_{2max}$).

Таким образом суммарные потери мощности батареи при неравномерном затенении групп СЭ и неверном определении точки максимальной мощности (ТЛМ) характеризуется системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{пб} = U_{1max} n_{пр} I_{1max} - U_{1max} (n_{пр о} I'_1 + n_{пр з} I'_2), \\ P_{\Delta U} = P_{пб} - pP, \\ P = U_n I_{1max}, \\ I_{1max} = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q \cdot (U_{1max} + I_{1max} \cdot R_{п})}{n_{пс о} (A \cdot k \cdot T)} \right) - 1 \right], \\ \frac{q(U_{1max} + I_{1max} R_{п})}{n_{пс} (AkT)} - \ln \frac{I_0 + I_{\phi}}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_{1max} + I_{1max} R_{п})}{n_{пс} (AkT)} \right)} = 0, \\ I'_1 = I_{\phi} - I_0 \exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_1 R_{п})}{n_{пс о} (AkT)} \right), \\ I'_2 = n_{пр з} \left(I_{\phi} - I_0 \exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_2 R_{п} + U_{д})}{n_{пс з} (AkT)} \right) \right), \text{ при } U'_2 < U_{2max}, \\ I'_2 = n_{пр з} \left(I'_{\phi} - I'_0 \exp \left(\frac{q(U'_{2max} + I'_2 R_{п} + U_{д})}{n_{пс о} (AkT)} \right) \right), \text{ при } U'_2 \geq U_{2max}. \end{array} \right.$$

На рисунке 32 изображены графики потерь мощности для батареи, состоящей параллельно-соединенных массивов СЭ, состоящих из 10-ти последовательно соединенных фотоэлектрических модулей PS-250 при

установке режима отбора от батареи в первой ТЛМ от ТХХ (неверном определении ТММ):

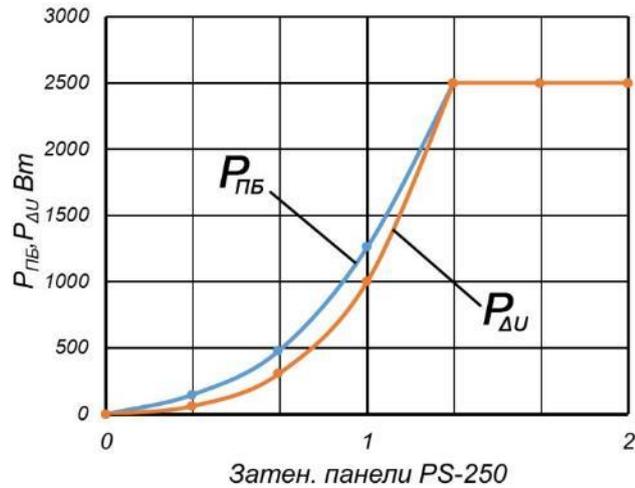


Рисунок 32 – Графики зависимости потерь мощности фотоэлектрической батареи от частичного затенения фотоэлектрических модулей одного из массивов

Представленный график показывает значение потерь мощности батареи, состоящей из любого числа параллельно соединенных массивов солнечных элементов, так как напряжение на выходе всех массивов будет одинаковым, равным напряжению ТММ массивов, не имеющих затенения. Из результатов моделирования видно, что при затенении одного модуля, мощность группы уменьшается в два раза, а более существенное затенение практически не позволяет вырабатывать энергию массиву.

Установка устройств согласования массивов фотоэлектрических модулей (УСФМ), описание которых приведено в 3-м разделе, в рассогласованные по напряжению массивы СЭ, позволяет увеличить их выходную мощность. При этом, математическое описание работы батареи солнечных элементов с УСФМ будет несколько отличаться в зависимости от варианта включения их в батарею – рядного, или батарейного (рисунок 33).

В случае рядного включения (рисунок 33а), электрическая энергия в УСФМ поступает от массива СЭ, в который он включен. Вследствие этого происходит преобразование характеристик рассогласованного массива в пределах его выходных значений электрических параметров. А в случае

батарейного включения (рисунок 33б), электрическая энергия в УСФМ поступает от всей батареи в количестве, необходимом для согласования рассогласованного массива. Таким образом, в рассогласованный массив поступает дополнительное количество энергии, что приводит к изменению его выходных электрических параметров, до значений, превышающих выходные значения такого массива без использования УСФМ. При этом, не зависимо от варианта включения, выходная мощность всей СФУ будет одинакова.

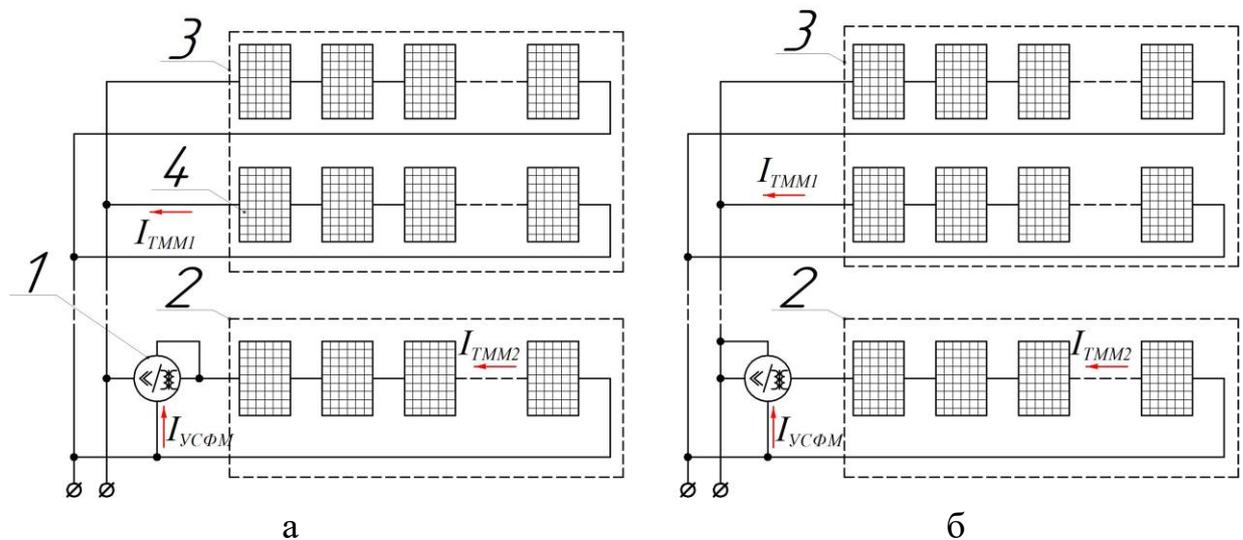


Рисунок 33 – Включение УСФМ в массив солнечных элементов
(а – рядное; б – батарейное)

(1 – УСФМ; 2 – рассогласованный массив СЭ; 3 – нормально освещенные массивы СЭ; 4 – фотоэлектрический модуль)

Использование УСФМ позволяет отбирать электрическую энергию от рассогласованного массива СЭ в ТММ. Это происходит в результате того, что нагрузка на выходе такого массива соответствует ТММ. При этом напряжение на его выходе равно напряжению других параллельных массивов. Объясняется это следующим образом:

Сопротивление нагрузки на выходе батареи, устанавливается устройством поиска точки максимальной мощности (ОММ). Соответственно сопротивление нагрузки на выходе каждого параллельно соединенного массива солнечных элементов одинаково. Допуская то, что ОММ

устанавливает режим отбора в первой ТЛМ от ТХХ, сопротивление нагрузки на выходе батареи можно вычислить:

$$R_{\text{ТММ1}} = \frac{U_1}{I_{\text{ТММ1}}}, \quad (45)$$

где U_1 – напряжение на выходе фотоэлектрической батареи, (В);

$I_{\text{ТММ1}}$ – ток в нормально освещенных массивах СЭ, (А).

Сопротивление нагрузки $R_{\text{ТММ1}}$, не позволяет установить в ТММ рассогласованный по напряжению массив солнечных элементов (с шунтированной частью элементов). Значение сопротивления нагрузки на выходе рассогласованного массива, для его установки в режим отбора в ТММ, можно вычислить:

$$R_{\text{ТММ2}} = \frac{U_2}{I_{\text{ТММ1}}}, \quad (46)$$

где U_2 – напряжение на выходе рассогласованного массива СЭ, (В).

При включении УСФМ в рассогласованный массив СЭ, сопротивление нагрузки на его выходе, с допущением того, что последовательное сопротивление на выходе УСФМ стремится к нулю, равно:

$$R_{\text{согл}} = \frac{R_{\text{ТММ1}} R_{\text{УСФМ}}}{R_{\text{ТММ1}} + R_{\text{УСФМ}}}, \quad (47)$$

где $R_{\text{УСФМ}}$ – сопротивление УСФМ, (Ом).

Сопротивление УСФМ можно вычислить как:

$$R_{\text{УСФМ}} = \frac{U_2}{I_{\text{УСФМ}}}, \quad (48)$$

где $I_{\text{УСФМ}}$ – ток на входе УСФМ, определяемый как:

$$I_{\text{УСФМ}} = \frac{\Delta U I_{\text{ТММ2}}}{U_2} = \frac{(U_1 - U_2) I_{\text{ТММ2}}}{U_2}, \quad (49)$$

где $I_{\text{ТММ2}}$ – ток рассогласованного массива с УСФМ, равный:

$$I_{\text{ТММ2}} = \frac{U_2 I_{\text{ТММ1}}}{U_1}. \quad (50)$$

Следовательно, входное сопротивление УСФМ после подстановки и преобразований равно:

$$R_{\text{усфм}} = \frac{U_2 U_1}{I_{\text{тмм1}}(U_1 - U_2)}. \quad (51)$$

Отсюда сопротивление нагрузки на выходе рассогласованного массива равно с УСФМ:

$$R_{\text{согл}} = \frac{\frac{U_1}{I_{\text{тмм1}}} \cdot \frac{U_2 U_1}{I_{\text{тмм1}}(U_1 - U_2)}}{\frac{U_1}{I_{\text{тмм1}}} + \frac{U_2 U_1}{I_{\text{тмм1}}(U_1 - U_2)}} = \frac{U_2}{I_{\text{тмм1}}} = R_{\text{тмм2}}.$$

Таким образом, установка УСФМ позволяет установить режим отбора электрической энергии от рассогласованного массива СЭ в ТММ с выходным напряжением, равным напряжению других параллельно подключенных массивов.

Потери мощности батареи с рядным включением УСФМ можно вычислить из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{пб}} = n_{\text{пр}} P_{\text{г}} - (n_{\text{пр о}} P_{\text{ог}} + n_{\text{пр з}} P_{\text{зг}}) = n_{\text{пр з}} (P_{\text{ог}} - P_{\text{зг}}), \\ P_{\text{ог}} = I_{\text{тмм1}} U_1, \\ P_{\text{зг}} = I_{\text{тмм1}} U_2 - \frac{\Delta U I_{\text{тмм1}}}{U_1} U_2 (1 - \eta_{\text{усфм}}), \\ I_{\text{тмм1}} = I_{\text{ф}} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_1 + I_{\text{тмм1}} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс о}} (AkT)} \right) - 1 \right], \\ \frac{q(U_1 + I_{\text{тмм1}} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс}} (AkT)} - \ln \frac{I_0 + I_{\text{ф}}}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_1 + I_{\text{тмм1}} R_{\text{п}})}{n_{\text{пс}} (AkT)} \right)} = 0, \\ \frac{q(U_2 + I_{\text{тмм1}} R_{\text{п}} + U_{\text{д}})}{(n_{\text{пс з}} (AkT))} - \ln \frac{I_0 + I_{\text{ф}}}{I_0 \left(1 + \frac{q(U_2 + I_{\text{тмм1}} R_{\text{п}} + U_{\text{д}})}{n_{\text{пс з}} (AkT)} \right)} = 0, \end{array} \right.$$

где $\eta_{\text{усфм}}$ – КПД УСФМ.

На рисунке 34 представлены сводные графики потерь мощности фотоэлектрической батареи, состоящей из параллельно соединенных массивов СЭ, образованных из последовательно соединенных 10-ти фотоэлектрических модулей PS-250 при частичном последовательном затенении модулей одного из массивов, полученные в результате математического моделирования:

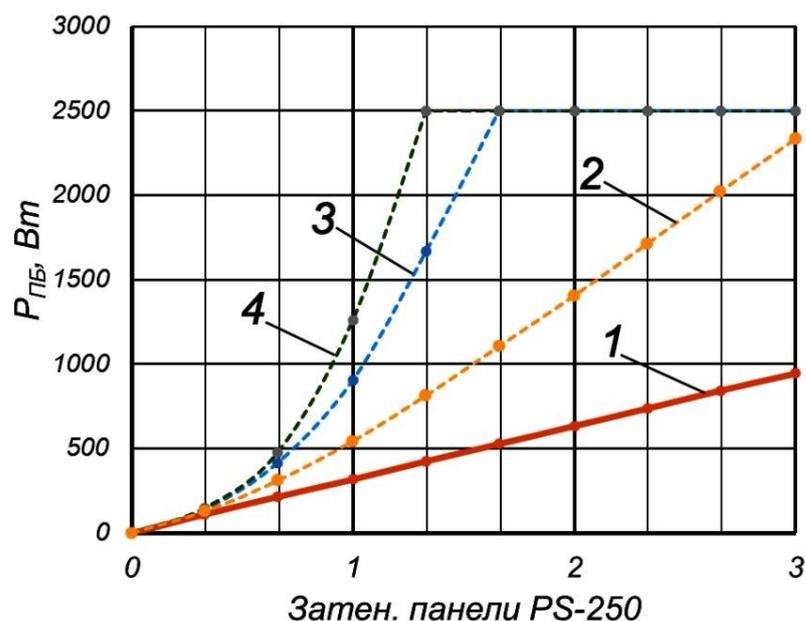


Рисунок 34 – Графики зависимости потерь мощности фотоэлектрической батареи от частичного затенения фотоэлектрических модулей одного из массивов СЭ

(1 – с УСФМ; 2 – состоящей из 3-х массивов СЭ и установке ОММ в ТАМ; 3 – состоящей из 10-ти массивов СЭ и установке ОММ в ТАМ; 4 – при установке ОММ в ТЛМ)

Из графиков видно, что установка УСФМ значительно снижает энергетические потери фотоэлектрической батареи при частичном затенении солнечных элементов, что существенно повышает энергетическую выработку батареи, работающую в таких условиях. Особо значительный эффект от использования УСФМ достигается при использовании в СФУ, состоящих из большого количества параллельных массивов СЭ, или использовании ОММ с алгоритмами поиска ТММ, устанавливающие режим отбора электрической энергии не в ТАМ. В таких случаях, частичное затенение более одной панели в параллельной группе, состоящей из десяти панелей, практически не позволяет вырабатывать электрическую энергию такой группы без УСФМ.

Выводы по разделу:

Составлена математическая модель солнечного элемента с использованием системы компьютерной алгебры Mathcad Prime 3, дающая возможность виртуального исследования его характеристик в соответствии с изменяющимися параметрами окружающей среды с точностью достаточной для инженерных расчетов. Приведены результаты моделирования.

Проведен теоретический анализ работы СФУ с последовательным соединением солнечных элементов, работающих в условиях равномерного и неравномерного освещения.

Разработана математическая модель СФУ с последовательным соединением солнечных элементов, позволяющая проводить теоретический анализ её работы при изменении условий окружающей среды и характере освещения – нормальной освещенности, частичном и равномерном затенении.

Определены факторы, приводящие к снижению энерговыработки СФУ с последовательным соединением солнечных элементов в условиях неравномерной освещенности. Приведен вариант повышения эффективности установки, работающей в таких условиях, заключающийся в установке индивидуальных согласующих преобразователей. Разработана математическая модель работы фотоэлектрической установки, состоящей из последовательно включенных фотоэлектрических модулей с индивидуальными согласующими преобразователями. Приведены результаты моделирования, из которых видно, что частичное затенение одного из модулей в установке, не позволяет вырабатывать ему электрическую энергию без использования индивидуальных согласующих преобразователей при отборе электрической энергии от установки в ТММ.

Проведен теоретический анализ работы СФУ с параллельным и смешанным соединением солнечных элементов, работающих в условиях равномерного и неравномерного освещения с разработанными математическими моделями.

Определены факторы, приводящие к снижению энерговыработки фотоэлектрических установок с параллельным и смешанным соединением солнечных элементов в условиях неравномерной освещенности. Установлено, что при параллельном соединении солнечных элементов с различной освещенностью, нормально освещенный элемент теряет до 7,4 % мощности. При смешанном соединении элементов в батарею, состоящую из 3-х параллельных массивов солнечных элементов, с равномерно затененными одним из массивов, потери мощности батареи только от рассогласования по напряжению составляют до 6,5 % от мощности затененного массива при отборе электрической энергии в ТАМ и до 18 % в случае отбора электрической энергии в первой ТЛМ от ТХХ. В случае неравномерного частичного затенения, снижение мощности батареи от рассогласованности по напряжению значительно больше, чем от снижения освещенности затененных солнечных элементов. На примере установки, мощностью 30 кВт видно, что частичное затенение 1-го модуля в массиве снижает до 40 % его мощность, а более 1-й панели практически не позволяет ему вырабатывать электрическую энергию.

Обоснован вариант повышения эффективности СФУ, работающих в условиях неравномерного освещения, заключающийся в установке устройств согласования фотоэлектрических модулей (УСФМ). Разработана математическая модель работы установки с УСФМ. Приведены результаты моделирования, показывающие существенное повышение мощности массива СЭ, работающего в условиях неравномерной освещенности с использованием УСФМ. Результаты моделирования работы установки мощностью 30 кВт показывают, что использование УСФМ снижает потери мощности группы солнечных элементов в 2,84 раза (с 905,9 Вт до 319 Вт) в случае частичного затенения одного модуля в массиве и до 4,72 раза (с 2490 Вт до 528 Вт) в случае более существенного затенения.

РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ОТБОРА МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАССИВОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

В предыдущих разделах показана необходимость согласования по напряжению параллельно-соединенных массивов фотоэлектрических модулей, работающих в условиях неравномерного освещения, выходе из строя части солнечных элементов, их загрязнении, или при различных номинальных напряжениях в ТММ. В настоящее время на рынке не представлено устройств, способных решать такую задачу. Существующие способы согласования, не представляются целесообразными вследствие низкой эффективности и высокой стоимости, свидетельством чего является их применение только в специальных установках, используемых в космической отрасли [1,77].

В настоящем разделе изложено описание изобретенного способа согласования массивов модулей [60] и его реализация в виде «Устройства согласования массивов фотоэлектрических модулей» (УСФМ), техническим результатом которого является повышение эффективности отбора электрической энергии от массивов, соединённых параллельно с одним, или несколькими другими массивами, с отличающимся номинальным напряжением в ТММ, или при шунтировании диодами части модулей вследствие затенения, загрязнения, выхода из строя. Особое внимание при разработке устройства уделено его технико-экономической составляющей, так как вопрос срока окупаемости является одним из важнейших для внедрения его на существующих наземных солнечных электростанциях. Причем пути удешевления устройства были не связаны с упрощением его конструкции, или использованием не дорогих менее качественных материалов, а в применении более технологичных, современных инженерных и научных решений.

3.1 Способ повышения эффективности отбора электрической энергии от массивов фотоэлектрических модулей

Одной из важнейших задач при разработке УСФМ является создание эффективного, не дорогого способа отбора электрической энергии от массивов фотоэлектрических модулей, соединенных параллельно, имеющих различное номинальное напряжение, или при шунтировании диодами части модулей вследствие затенения, загрязнения, выходе из строя.

Сущность способа поясняется рисунком 35 и заключается в том, что для отбора максимальной мощности от массивов фотоэлектрических модулей (1), выполняют согласование массивов посредством включения в каждый из них (нуждающийся в согласовании) дополнительного элемента питания (2). Напряжение каждого дополнительного элемента питания регулируют при помощи электронного вычислительного устройства (5), до значения, при котором суммарная мощность СФУ будет максимальна. Электрическую энергию в дополнительный элемент питания подают из этих же фотоэлектрических батарей, обеспечив гальваническую развязку, или от любого другого источника электрической энергии. Одновременно с этим отслеживают точку максимальной мощности массивов фотоэлектрических модулей и выполняют её оптимизацию при помощи устройства отбора максимальной мощности (3). После этого электрическую энергию передают напрямую к нагрузке (4), или через преобразователь, или аккумулируют.

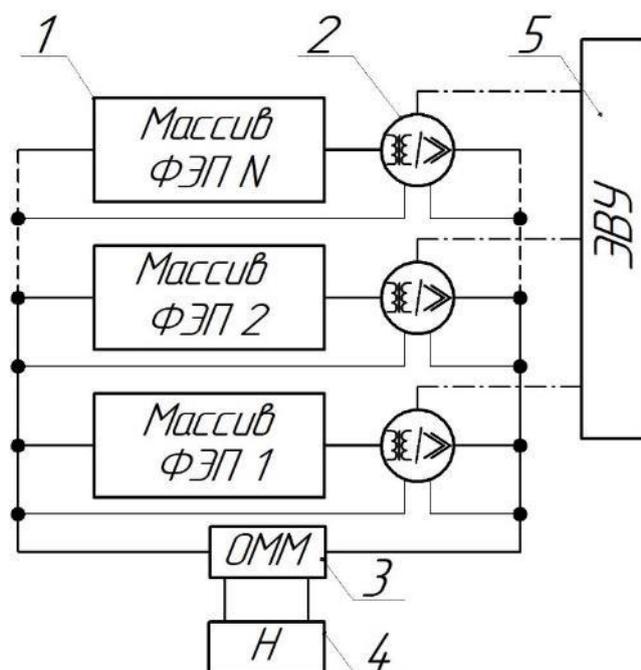


Рисунок 35 – Структурная схема способа отбора максимальной мощности от массивов фотоэлектрических модулей

Сущность предлагаемого способа также поясняется рисунком 36 на котором изображена вольт-амперная характеристика массивов фотоэлектрических модулей с бóльшим номинальным напряжением (при этом все преобразователи включены в работу) и массива с меньшим номинальным напряжением, или имеющим затененный, загрязненный, неисправный один, или несколько солнечных элемента (часть элементов шунтированы диодами). Из графика видно, что точки максимальной мощности у массивов фотоэлектрических модулей (T_1 и T_3), имеющих различное номинальное напряжение, не совпадают. В связи с этим, отбор электрической энергии у массива, имеющего меньшее номинальное напряжение, производится в неоптимальной точке T_2 , в следствие чего, он вырабатывает не максимальную электрическую мощность, как показано во 2-м разделе.

Для того, чтобы произвести отбор электрической энергии в точке максимальной мощности (T_3) от массива СЭ с меньшим номинальным напряжением, предлагается включить в него последовательно дополнительный элемент питания, имеющий номинальное напряжение равное

ΔU и способный выдавать ток не меньше тока в точке максимальной мощности массива СЭ не имеющего затенения I_1 . При этом значение его электрической мощности составит:

$$P' = \Delta U \cdot I_1, \quad (52)$$

где P' – мощность дополнительного элемента питания, (Вт);

ΔU – напряжение дополнительного элемента питания, (В);

I_1 – ток в точке максимальной мощности массива СЭ без затенения, (А).

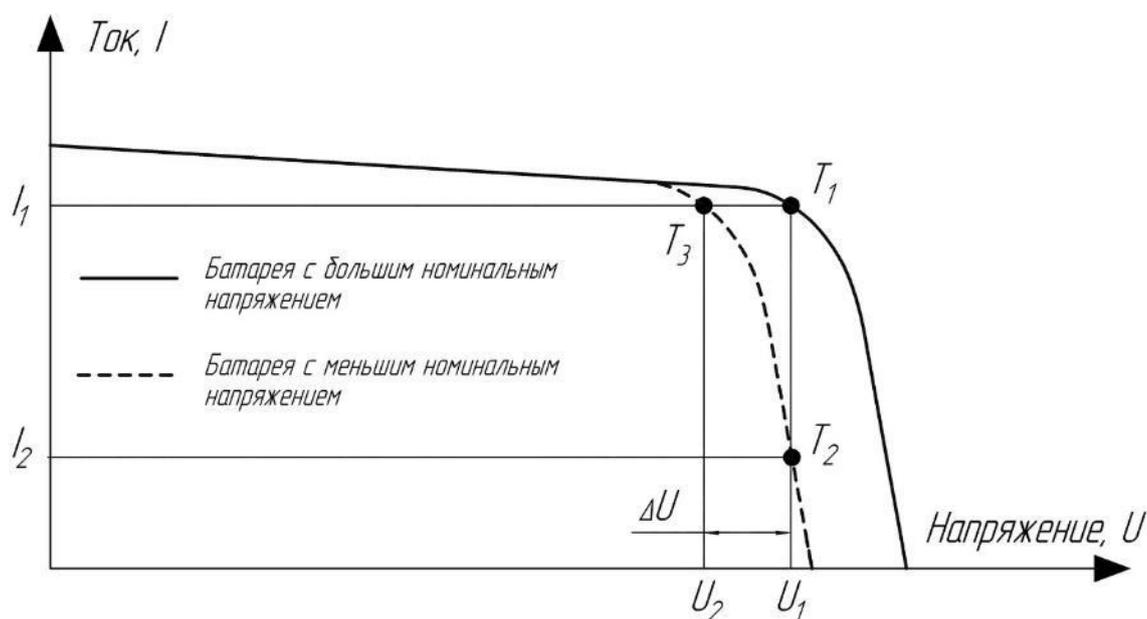


Рисунок 36 – Вольт-амперные характеристики массивов фотоэлектрических модулей с большим и меньшим номинальным напряжением

Из рисунка 36 видно, что площадь фигуры, ограниченной точками U_1, U_2, T_3, T_1 меньше фигуры T_1, T_2, I_2, I_1 из-за того, что напряжение U_1 значительно больше ΔU , а ток I_1 значительно больше I_2 . Вследствие этого, электрическая мощность дополнительного элемента питания P' меньше мощности ΔP , теряемой в массиве с меньшим номинальным напряжением. Из этого следует, что при отборе электрической энергии данным способом можно получить её большее количество в случае шунтирования диодами части модулей вследствие их затенения, загрязнения, выходе из строя одного, или нескольких

солнечных элементов, или при использовании массивов фотоэлектрических модулей с разными номинальными напряжениями.

На рисунке 37, представлен первый пример осуществления способа, заключающийся в следующем: «В массив (1), состоящий из последовательно соединенных солнечных элементов (2), устанавливают дополнительный элемент питания (3) со способностью выдачи тока не меньше максимального, вырабатываемого элементами, и с изменяемым значением напряжения, значения которого устанавливают при помощи электронного вычислительного устройства (4). Параллельно дополнительному элементу питания устанавливают обратно включенный диод (5) для отключения (шунтирования) устройства при отсутствии необходимости в согласовании модулей, или выходе его из строя. Электрическую энергию в элемент питания подают от этих же массивов фотоэлектрических модулей через устройство, обеспечивающее гальваническую развязку (6), или от любого внешнего источника электрической энергии. В цепь этого же массива и любого другого (соединенного параллельно к согласуемому) устанавливают датчики тока (7) (резистивные, на эффекте Холла, или другие, измеряющие постоянный ток), посредством которых передают мгновенные значения токов массивов в вычислительное устройство. В вычислительном устройстве отслеживают разницу мгновенных показаний датчиков и, в случае её изменения, подают управляющий сигнал от вычислительного устройства в установленный элемент питания, соответствующий постепенному повышению напряжения на элементе питания. Данную операцию производят до тех пор, пока значения разницы токов в массивах не примет минимальное значение, или ток в массиве, нуждающегося в согласовании, не достигнет своего максимального значения при неизменном токе в другом ряде. После этого продолжают производить контроль за разницей значений токов в массивах и, в случае её изменения, обнуляют значение напряжения в элементе питания и операцию производят сначала. Одновременно с этим отслеживают точку максимальной мощности всех параллельно соединенных массивов фотоэлектрических

модулей и выполняют её оптимизацию при помощи устройства отбора максимальной мощности (8)».

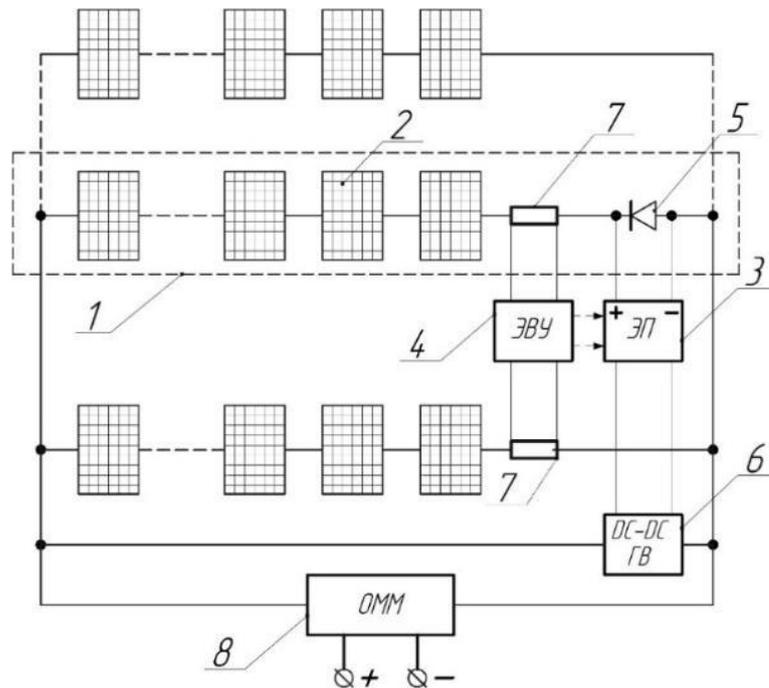


Рисунок 37 – Функциональная схема реализации первого способа отбора электрической энергии от массивов фотоэлектрических модулей с контролем тока в отдельных массивах

На рисунке 38, представлен второй пример осуществления способа: «В общую цепь массивов фотоэлектрических модулей (2) устанавливают только один датчик тока (7). Затем, при помощи электронного вычислительного устройства (4), изменяют значение напряжения на дополнительном элементе питания (3), установленного последовательно в цепь СФУ (1), нуждающейся в согласовании. В это же время, посредством датчика тока, измеряют значение тока в общей цепи и передают его в электронное вычислительное устройство. Данную операцию производят до тех пор, пока значение тока не примет максимальное значение. После этого производят, при помощи электронного вычислительного устройства, контроль за значением тока и, в случае его изменения, обнуляют значение напряжения в элементе питания и операцию производят сначала. Одновременно с этим отслеживают точку максимальной мощности всех параллельно включенных массивов фотоэлектрических

модулей и выполняют её оптимизацию при помощи устройства отбора максимальной мощности (8)».

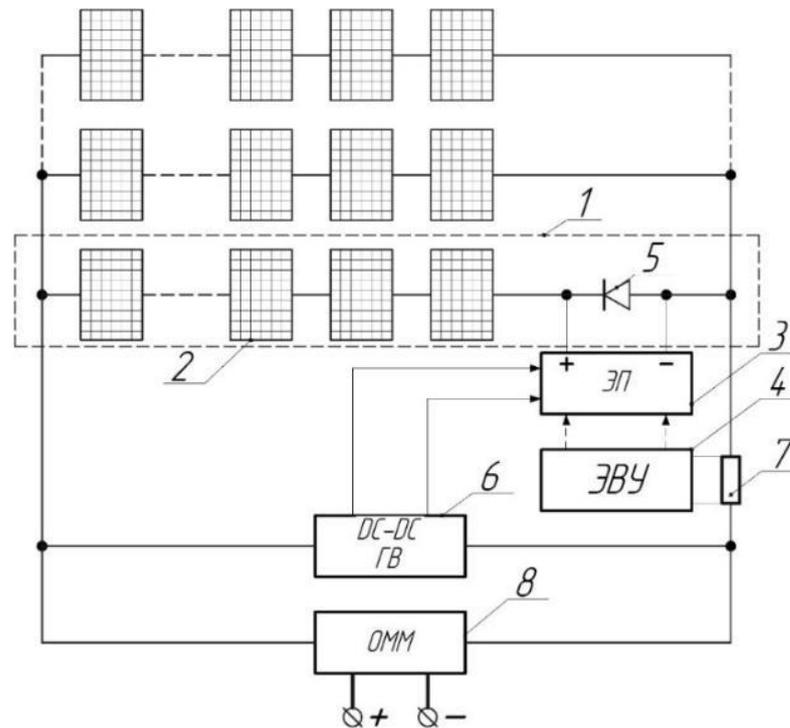


Рисунок 38 – Функциональная схема реализации второго способа отбора электрической энергии от массивов фотоэлектрических модулей с контролем тока в общей цепи

Также возможен вариант осуществления способа, заключающийся в том, что используется один датчик тока, устанавливаемый в регулируемый массив, и по его показаниям осуществляется регулирование напряжение «добавки» дополнительного элемента питания. Данный вариант более сложен с точки зрения алгоритмов регулирования, однако упрощает установку устройства, т.к. в нем отсутствует необходимость в использовании наружных датчиков тока.

3.2 Разработка функциональной схемы УСФМ

На основе разработанного способа построена функциональная схема УСФМ, изображенная на рисунке 39:

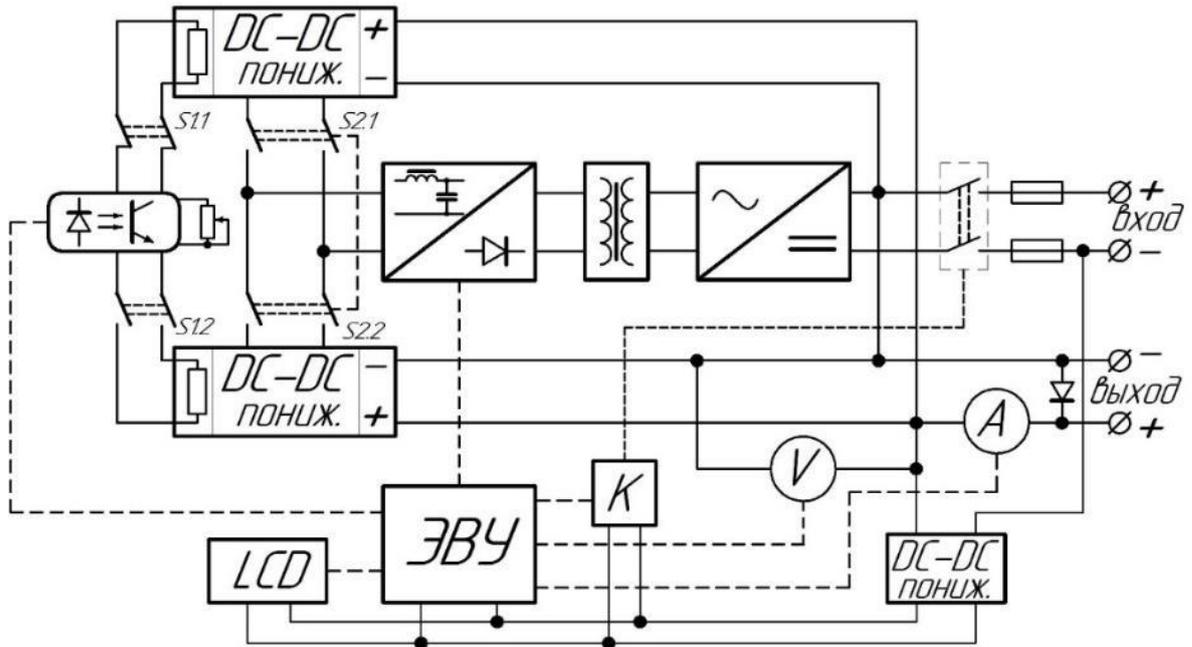


Рисунок 39 – Функциональная схема УСФМ

Принцип работы заключается в следующем: электрическая энергия от массива фотоэлектрических модулей проходит через последовательно включенный выход регулируемого DC-DC преобразователя (повышающего, или понижающего в зависимости от режима работы, установленного группами контакторов $s1$ и $s2$) и датчик тока (I_{count}). Информация от датчика тока поступает на аналого-цифровой вход электронно-вычислительного устройства (ЭВУ), в котором производится обработка и регистрация значения тока массива. Затем ЭВУ через оптопару посылает управляющий сигнал на DC-DC преобразователь для увеличения его выходного напряжения на один квант. При этом ЭВУ отслеживает изменение значения тока. Если произошло увеличение силы тока, то оно снова посылает управляющий сигнал на DC-DC преобразователь для увеличения напряжения ещё на один квант. Такая последовательность действий повторяется до тех пор, пока увеличение напряжения DC-DC преобразователя не перестанет вызывать увеличение значений силы тока массива фотоэлектрических модулей, или напряжение DC-DC преобразователя достигнет максимального значения. После установки оптимального режима работы, устройство переходит в режим контроля, во время которого по значениям тока отслеживаются параметры работы массива.

В случае изменения этих параметров напряжение DC-DC преобразователя обнуляется, и регулировка начинается сначала.

Так как электрическая энергия в DC-DC преобразователь поступает из этого же массива (согласно способу работы), то необходимо на его входе обеспечить гальваническую развязку. Для этого используется высокочастотный преобразователь напряжения с импульсным трансформатором. Данный элемент состоит из ЭВУ, который посылает управляющие сигналы на драйвер инвертора и обеспечивает защиту от короткого замыкания (КЗ) и перегрузок посредством размыкания цепи инвертора при помощи электромагнитного реле (К), высокочастотного импульсного трансформатора и выпрямителя с фильтром.

Для обеспечения ЭВУ стабилизированным пониженным напряжением в схеме предусмотрен понижающий преобразователь постоянного напряжения.

Индикация работы устройства, значения выходных электрических параметров, выбранном режиме работе и эффективности работы осуществляется посредством жидкокристаллического экрана (LCD).

Для регулирования напряжения DC-DC преобразователей в ручном режиме (для исследовательских целей), или использовании устройства в случае параллельной коммутации фотоэлектрических модулей с изначально различными значениями напряжений, в схеме предусмотрен потенциометр $R_{п}$, подключенный параллельно оптопаре.

Важными достоинствами разработанной схемы является то, что для согласования массивов фотоэлектрических модулей не требуется преобразование всей электрической энергии, а только лишь её части и то, что все преобразователи имеют достаточно высокий коэффициент полезного действия, вследствие того, что в них используются принципы высокочастотного преобразования.

На основании разработанной функциональной схемы выполняется расчет и разработка всех функциональных элементов устройства, а также разработка принципиальной схемы.

3.3 Разработка принципиальной схемы УСФМ

При разработке и проектировании систем автоматизации после выполнения функциональной схемы следующим этапом является разработка принципиальной схемы [35].

В данном разделе представлен расчет и разработка всех функциональных элементов интеллектуального устройства отбора максимальной мощности и согласования массивов фотоэлектрических модулей, являющиеся составными частями принципиальной схемы устройства. При разработке функциональных элементов особое внимание было уделено моделированию и, в том числе, математическому. Это позволило осуществить отладку и настройку компонентов без сборки их реальных моделей.

При разработке принципиальной схемы предъявлялись следующие требования:

- надежность (способность выполнять заданные функции, сохраняя с течением времени параметры установленных эксплуатационных показателей);
- удобство эксплуатации (возможность максимального снижения трудозатрат и внимания обслуживающего персонала);
- безопасность (предотвращение возникновения повреждения оборудования и причинения вреда обслуживающему персоналу при использовании устройства и в аварийных ситуациях);
- экономичность (выбор наиболее целесообразного оборудования, технологии и компонентов с точки зрения технико-экономических показателей);
- эффективность (минимизация энергетических потерь с целью получения наибольших значений КПД).

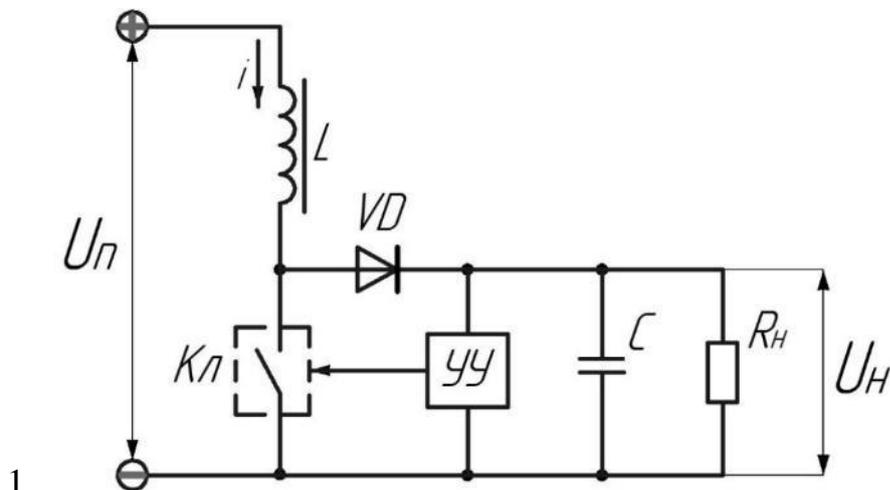
3.3.1 Разработка повышающего DC-DC преобразователя

Для согласования по напряжению массивов фотоэлектрических модулей, в функциональной схеме использованы регулируемые DC-DC преобразователи. С их помощью производится увеличение напряжения «добавки» до значения, при котором мощность модулей будет максимальна. В данном подразделе приводится расчет повышающего DC-DC преобразователя. Основными характеристиками, предъявляемыми перед преобразователем, являются:

- диапазон выходных напряжений не менее 90 В, что соответствует напряжению, соответствующим 3-м промышленным фотоэлектрическим модулям (типа PS-250, KV-260 и т.д.), применяемых на промышленных солнечных электростанциях;

- значение силы тока в номинальном режиме не менее 8,5 А, что также соответствует максимальному току в ТММ вышеуказанным фотоэлектрическим модулям.

В качестве DC-DC преобразователя была выбрана бустерная (boost) схема, получившая в последнее время широкое распространение в энергетических установках различного назначения, включающих первичные источники электрической энергии имеющие постоянное напряжение, например, аккумуляторные, или солнечные батареи. Базовая схема бустерного преобразователя изображена на рисунке 40:



1
Рисунок 40 – Базовая схема бустерного преобразователя

Принцип работы преобразователя заключается в следующем: ключевой элемент (Кл) работает в импульсном режиме и управляется устройством управления (УУ). Диод (VD) блокирует нагрузку (Rн) и фильтрующий конденсатор (С) в моменты замыкания ключа, в этот момент происходит заряд дросселя (L), вследствие прохождения тока i , при этом ток в нагрузку поступает от заряженного конденсатора. После размыкания ключа, ЭДС самоиндукции дросселя суммируется с напряжением источника питания, в результате этого выходное напряжение (U_n) становится выше напряжения питания (U_p). Напряжение на дросселе, через протекающий по нему ток, определяется уравнением:

$$U_L = L \frac{di}{dt}, \quad (53)$$

где U_L – напряжение на дросселе, (В);

L – индуктивность дросселя, (Гн);

i – ток, текущий через дроссель в момент заряда дросселя, (А);

t – время, (с).

Таким образом, расчет индуктивности дросселя является одним из наиболее ответственных операций для правильной работы преобразователя.

Расчет выполнен с учетом методики [76] по следующему плану:

- 1) По исходным значениям максимального времени заряда (t_{zmax}), напряжению на нагрузке (U_n), частоте (f), мощности нагрузки (P_n) и минимального напряжения питания (U_{pmin}) необходимо вычислить максимальное граничное значение индуктивности дросселя (L_{max}).
- 2) По исходным значениям минимального напряжения питания (U_{pmin}), максимального времени заряда (t_{zmax}) и току источника питания (i_p) необходимо вычислить минимальное граничное значение индуктивности дросселя (L_{min}).
- 3) Проверить выполнение условия - вычисленное значение L_{max} должно быть больше L_{min} .
- 4) Принять L_{min} в качестве L .

Максимальное граничное значение индуктивности дросселя может быть вычислено из уравнения:

$$L_{max} = \frac{U_{\Pi} \cdot U_{H} \cdot t_{зmax}}{2P_{H}}, \quad (54)$$

а минимально граничное значение индуктивности дросселя:

$$L_{min} = \frac{U_{\Pi min} \cdot t_{зmax}}{i_{Lmax}} = \frac{U_{H} \cdot D \cdot (1 - D)^2}{2 \cdot i_{H} \cdot f}, \quad (55)$$

где U_{H} – напряжение на нагрузке, (В);

D – коэффициент заполнения (величина обратная скважности);

i_{H} – ток, протекающий через нагрузку (А);

f – частота, (Гц).

С учетом того, что минимальное граничное значение индуктивности во всем диапазоне коэффициентов заполнения (от 0 до 1) принимает наибольшее значение при коэффициенте заполнения (D) равном 0,5, можно упростить выражение для нахождения L_{min} :

$$L_{min} = \frac{0,063 \cdot U_{H}}{i_{H} \cdot f}, \quad (56)$$

Необходимо также учесть то, что минимальное значение граничной индуктивности дросселя ограничено не только условием непрерывности тока, но и величиной предельного тока ключевого элемента. Исходя из этого выражение для вычисления минимального значения граничной индуктивности дросселя примет вид:

$$L_{min} = \frac{0,025 \cdot U_{H}}{i_{VT} \cdot f}, \quad (57)$$

где i_{VT} – максимальный ток ключевого элемента, (А).

Для обеспечения стабильности работы преобразователя необходимо увеличить вычисленное значение индуктивности на 20-30 % для обеспечения токового запаса.

Так как дроссель для преобразователя изготавливается из феррита марки НН, НМ, или НМС с магнитной проницаемостью $\mu > 600$, индуктивность

дросселя тороидальной формы, прямоугольного сечения можно рассчитать по упрощенной формуле:

$$L = \frac{5\mu_0}{2\pi} w^2 \frac{l}{\ln\left(\frac{l}{a+b}\right) + 0,29}, \quad (58)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, (Гн/м);

w – количество витков;

l – длина сердечника, (м);

a и b – стороны прямоугольного сечения сердечника, (м).

Вследствие того, что выходное напряжение преобразователя, выполненного по бустерной схеме, всегда имеет на выходе пульсации, важно принять меры по их снижению. Для этой цели в схеме предусматривается конденсатор (С), выполняющий роль фильтра, рассчитанный согласно методики [76].

Величина напряжения зарядной «добавки» конденсатора, обусловленной разрядом дросселя L, вычисляется согласно уравнению:

$$\Delta U_Q = \frac{Q}{C}, \quad (59)$$

где ΔU_Q – значение величины напряжения зарядной «добавки» конденсатора, (В);

Q – значение заряда, накопленного индуктивностью в первой фазе и передаваемого конденсатору, равного $Q = t_p \cdot i_p$, (Кл);

C – емкость фильтрующего конденсатора; $Q = t_p \cdot i_p$.

Величина тока заряда определяется из соотношения:

$$i_3 = \frac{U_{пз}}{L}. \quad (60)$$

Так как величина зарядного и разрядного токов одинакова, значение абсолютного уровня пульсаций в нагрузке может быть вычислено из соотношения:

$$\Delta U_Q = \frac{U_{\text{п}} t_3 t_p}{LC}. \quad (61)$$

Из уравнения видно, что энергия, накапливаемая в индуктивности, без потерь переходит в энергию заряда конденсатора, что вполне допустимо принять в практических расчетах. Исходя из этого, коэффициент пульсаций можно вычислить из уравнения:

$$K_{\text{п}} = \frac{\Delta U_Q}{U_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{н}}} \cdot \frac{t_3 t_p}{LC}. \quad (62)$$

Решив данное уравнение относительно C , получим уравнение для нахождения емкости конденсаторного фильтра:

$$C = \frac{U_{\text{п}} t_3 t_p}{U_{\text{н}} K_{\text{п}}}. \quad (63)$$

Вследствие того, что энергия магнитного поля, накопленная в дросселе, полностью переходит в энергию электрического поля конденсатора, а также то, что изменение индуктивного значительно меньше входного тока, емкость конденсатора можно вычислить из уравнения:

$$C > \frac{i_{\text{н}}}{f \Delta U_Q}. \quad (64)$$

Выбирать конденсатор необходимо также и по величине последовательного активного сопротивления (ESR) для недопущения перегрева конденсатора. Особенно этому параметру необходимо уделить внимание при выборе электролитических конденсаторов. При проектировании описываемого устройства, для снижения вероятности повреждения выходного конденсатора, было установлено два параллельно соединенных конденсатора, на выходе повышающего преобразователя вместо одного. Для определения значения ESR рекомендуется придерживаться соотношением [76]:

$$ESR < \frac{\Delta U_Q}{\Delta i_L}, \quad (65)$$

где Δi_L – изменение индуктивного тока.

В качестве блокирующего диода в схеме используются диоды Шоттки, имеющие, в сравнении с обычными диодами, значительно меньшее падением

напряжения, вследствие невысокого сопротивления в прямом направлении, а также повышенное быстродействие. Все эти достоинства уменьшают потери и соответственно повышают КПД устройства. Разработчику необходимо выбрать подходящий по прямому току, падению напряжения на диоде и конструкции корпуса диод Шоттки. Тепловые потери диода можно вычислить из следующего соотношения:

$$Q_{VD} = U_{VD} \cdot i_H, \quad (66)$$

где Q_{VD} – тепловые потери диода, (Вт);

U_{VD} – прямое падение напряжения на диоде, (В).

Ключевой элемент DC-DC преобразователя необходимо выбирать исходя из значения максимального тока дросселя, который можно вычислить из уравнения:

$$i_{max} = i_{BX} + 0,5\Delta i_L, \quad (67)$$

где

$$i_{BX} = i_H \cdot \frac{U_H}{U_H}, \quad (68)$$

В качестве ключевого элемента наиболее предпочтительным представляется использование полевых МОП-транзисторов (MOSFET), или биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) вследствие их низкого сопротивления в состоянии насыщения. Тепловой режим работы транзистора можно вычислить из уравнения:

$$Q_{VT} = \left(\frac{i_H}{1-D}\right)^2 \cdot R_{ds(нас)} \cdot D + \frac{1}{2} \cdot U_H \left(\frac{i_H}{1-D}\right)^2 \cdot (t_r + t_f) \cdot f, \quad (69)$$

где $R_{ds(нас)}$ – сопротивление транзистора между стоком - истоком транзистора (MOSFET) в состоянии насыщения (в случае использования транзистора IGBT, сопротивление между коллектором и эмиттером), (Ом);

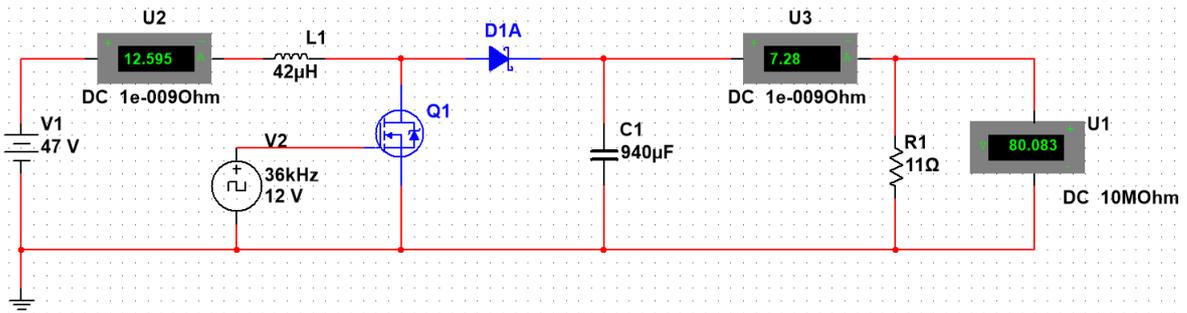
t_r – время нарастания импульса открытия транзистора, (с);

t_f – время спада импульса закрытия транзистора, (с);

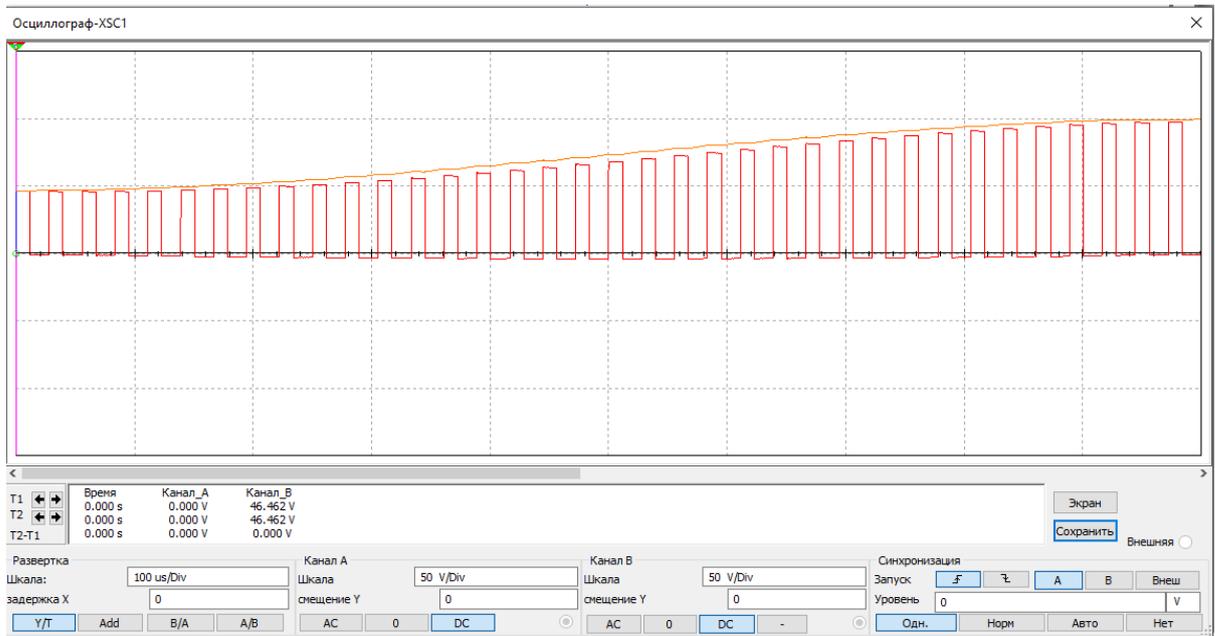
f – частота, (Гц).

Первый член этого уравнения характеризует статические потери транзистора в состоянии насыщения, а второй – динамические, в моменты его переключения. Для определения максимального тепловыделения, необходимо подставлять максимальное значение коэффициента заполнения (D), обеспечиваемое схемой преобразователя.

Произведя математические вычисления параметров основных элементов повышающего DC-DC преобразователя производится компьютерное моделирование преобразователя. На рисунке 41а изображен снимок экрана компьютерной модели преобразователя, а на рисунке 41б снимок осциллограммы, иллюстрирующий её работу:



а



б

Рисунок 41 – Компьютерное моделирование повышающего DC-DC преобразователя

Для разработки реальной принципиальной схемы необходимо выбрать контроллер, управляющим ключевым элементом (транзистором), а также выполняющий защиту от КЗ. Интересным для этой цели представляется контроллер фирмы ON Semiconductor UC3843A, разработанный специально для использования в DC-DC преобразователях, имеющий низкую стоимость и подходящие характеристики [106].

Обеспечив контроллер необходимой элементной обвязкой для установки расчетной частоты работы преобразователя, блоком стабилизированного питания, регулировки выходных значений напряжения и тока, датчиком тока (включающий шунт с усилителем), индикатора работы и дополнительных фильтров можно составить принципиальную схему преобразователя, изображенную на рисунке 42:

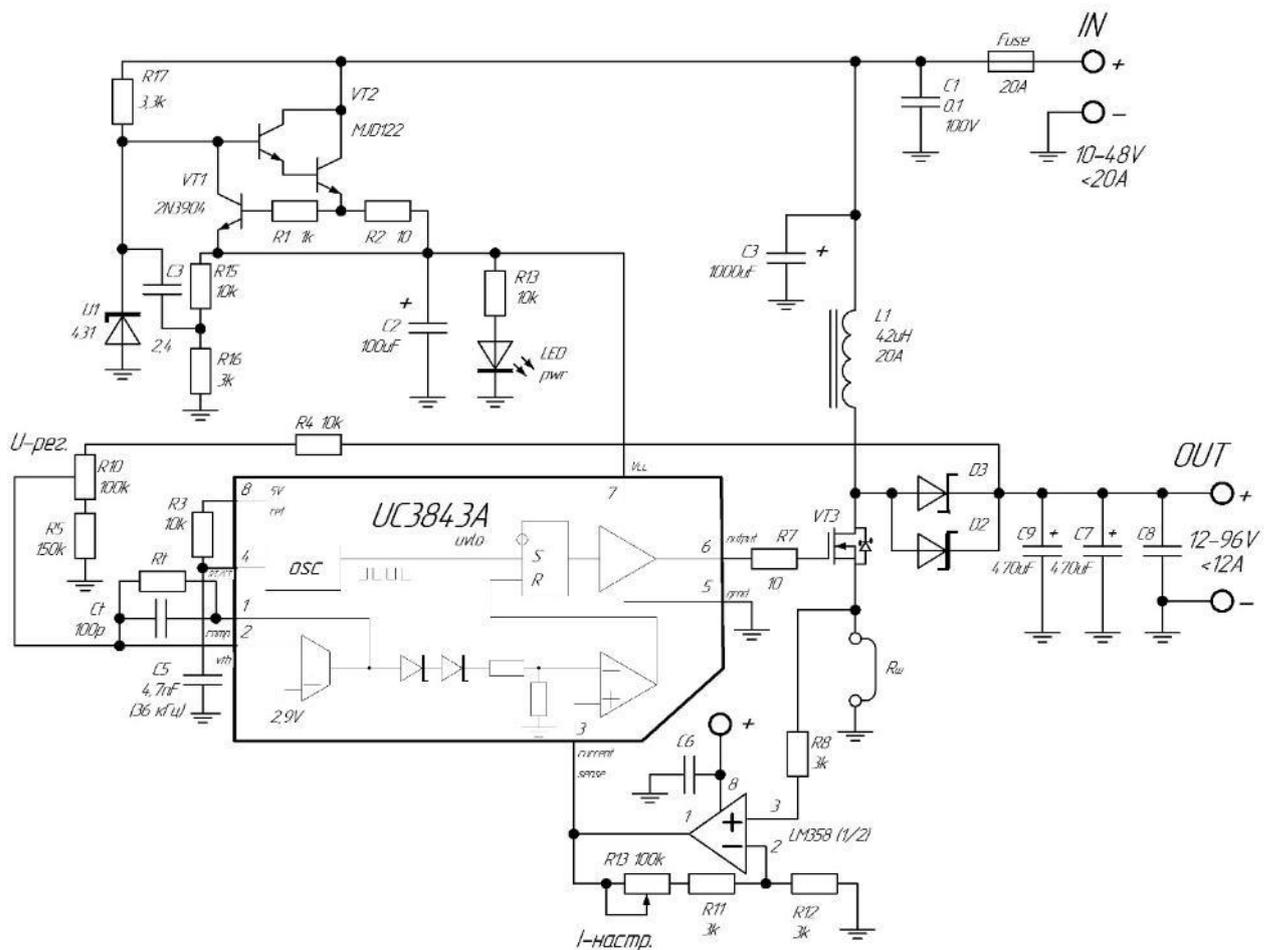


Рисунок 42 – Принципиальная схема повышающего DC-DC преобразователя

На рисунке 43 изображен общий вид повышающего DC-DC преобразователя, изготовленного по принципиальной схеме, изложенной в данном подразделе:

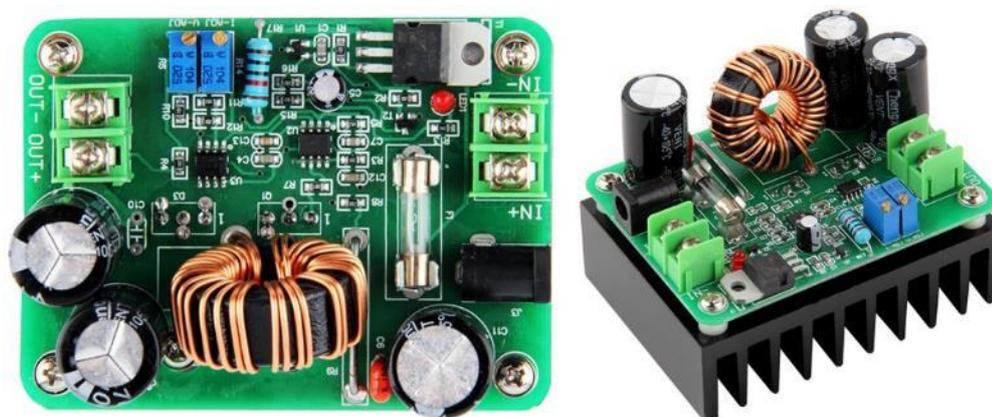


Рисунок 43 – Общий вид повышающего DC-DC преобразователя

Разработанная схема преобразователя рассчитана на диапазон входных напряжений от 10 до 48 В. Диапазон выходных напряжений находится в пределах от 12 до 96 В. Максимальный ток на выходе составляет 12 А. Из характеристик видно, что в случае использования преобразователя по вышеописанному способу с промышленно изготавливаемыми солнечными панелями (типа PS-250, KV-260, KV-245 и др.), устройство способно осуществить отбор максимальной мощности от фотоэлектрического модуля при полном затенении до трех, или частичном затенении до девяти фотоэлектрических панелей.

3.3.2 Разработка инверторного преобразователя с гальванической развязкой

Согласно разработанному способу, электрическая энергия, поступающая от DC-DC преобразователей, должна быть частью энергии от этих же массивов фотоэлектрических модулей. Вследствие этого, необходимо обеспечить гальваническую развязку между массивами и входом в DC-DC преобразователь. Для решения этой задачи был использован высокочастотный двухтактный преобразователь, выполненный по двухфазной пуш-пульной

схеме (push-pull). Достоинствами данного преобразователя являются высокая эффективность, малые габаритные размеры, простота настройки и изготовления. На рисунке 44 изображена базовая схема пуш-пулл преобразователя:

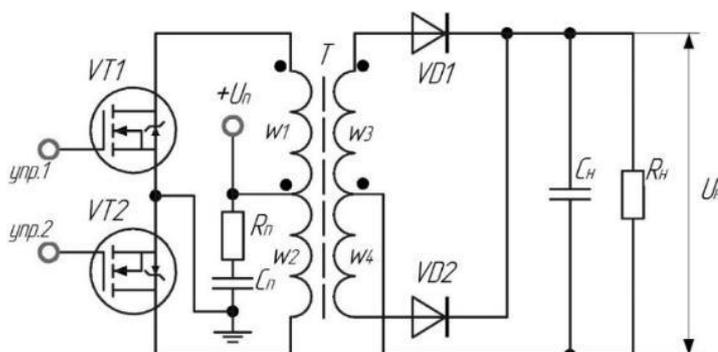


Рисунок 44 – Базовая схема преобразователя пуш-пулл

Схема преобразователя состоит из двух ключевых транзисторов (VT1 и VT2), работающие поочередно. Первичная обмотка трансформатора (Т) состоит из двух обмоток (w1, w2), соединенных таким образом, что конец первой обмотки (w1) соединен с началом второй (w2), образуя среднюю точку к которой подводится плюс источника питания (+Uп). Вторичная обмотка намотана по такому же принципу, как и первичная, и образует, вместе с диодами (VD1, VD2) и конденсатором (Сн), двухфазный двухполупериодный выпрямитель с фильтром пульсаций.

Принцип работы преобразователя заключается в следующем: в первом такте VT1 находится в состоянии насыщения, соответственно VT2 – закрыт, электрический ток течет по пути "+Uп > обмотка трансформатора w1 > сток-исток VT1 > - Uп", в результате этого во вторичной обмотке w3 возникает электрический ток, согласно закону электромагнитной индукции, который течет по пути "конец обмотки w3 > диод VD1 > Rн > начало обмотки w3". При этом происходит подзарядка сглаживающего конденсатора Cн. Во втором такте транзистор VT1 закрывается, а транзистор VT2 переходит в состояние насыщения. В результате этого электрический ток возникает во вторичной обмотке w4 и проходит через диод VD1. Таким образом исходит непрерывная передача электрической энергии в нагрузку во время обоих тактов. Учитывая

также то, что коэффициент заполнения (D) не может превышать значения 0,5, можно определить среднее значение напряжения за один такт по формуле:

$$U_H = \frac{2}{T} \int_0^T U_{II} n dt = 2nDU_{II}, \quad (70)$$

где n – коэффициент трансформации трансформатора;

D – коэффициент заполнения;

U_{II} – напряжение питания, (В).

Расчет высокочастотного импульсного трансформатора для данного преобразователя производился согласно методике, описанной в [52].

Напряжение источника питания преобразователя можно вычислить из уравнения:

$$U_{II \text{ пр}} = U_{II} + \frac{U_{II} \cdot \Delta U_{II}}{100}, \quad (71)$$

где U_{II} – номинальное напряжение источника питания, (В);

ΔU_{II} – пульсации источника питания, (В).

Максимальный КПД трансформатора можно вычислить по эмпирической формуле:

$$\eta = 0,99 - \frac{0,175}{f} - \frac{1 + \frac{9,95}{f^{1,3}}}{P_H}, \quad (72)$$

где f – частота, (кГц);

P_H – мощность, потребляемая нагрузкой.

Габаритная мощность трансформатора рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{габ}} = 2 \cdot S_c \cdot S_0 \cdot f \cdot B_m \cdot \eta \cdot J \cdot s \cdot k_c \cdot k_m \cdot k_\phi \cdot 10^{-2}, \quad (73)$$

где S_c – площадь сечения магнитопровода, (м^2);

S_0 – площадь окна магнитопровода, (м^2);

B_m – максимальное значение магнитной индукции магнитопровода, (Тл);

J – плотность тока в обмотках, ($\text{А}/\text{мм}^2$);

s – число стержней сердечника (т.к. применяется тороидальный сердечник $s=1$);

k_c – коэффициент заполнения площади поперечного сечения магнитопровода ферромагнетиком;

k_m – коэффициент заполнения окна обмотками;

k_ϕ – коэффициент формы преобразовываемого напряжения (для прямоугольной – 1, для синусоидальной 1,11).

Число первичной обмотки трансформатора определяется из уравнения:

$$w_1 = \frac{U_1}{4 \cdot f \cdot B_m \cdot S_c \cdot k_c \cdot k_\phi} \quad (74)$$

Индуктивность первичной обмотки трансформатора можно найти из соотношения:

$$L_1 = \frac{w_1^2 \cdot \mu_{\text{эфф}} \cdot \mu_0 \cdot S_c}{l_{\text{ср.л}}}, \quad (75)$$

где $\mu_{\text{эфф}}$ – эффективная магнитная проницаемость сердечника, (Гн/м);

μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, (Гн/м);

$l_{\text{ср.л}}$ – длина средней линии магнитопровода.

Амплитудные значения тока первичной обмотки для преобразователя пуш-пулл вычисляются согласно выражению:

$$I_{1\text{max}} = \frac{P_{\text{исп}}}{U_{\text{п пр}} - U_{VT(\text{нас})}}, \quad (76)$$

где $P_{\text{исп}}$ – используемая мощность трансформатора, (Вт);

$U_{VT(\text{нас})}$ – падение напряжения на транзисторе в состоянии насыщения, (В).

Для проверки правильности выбора магнитопровода, необходимо произвести проверку. Для этого необходимо сравнить вычисленное амплитудное значение первичной обмотки ($I_{1\text{max}}$) с амплитудным значением тока преобразователя, имеющим треугольную форму ($I_{1\text{max тр}}$). В случае, если $I_{1\text{max тр}}$ превысит 10 % $I_{1\text{max}}$ ($I_{1\text{max тр}} > 0,1 \cdot I_{1\text{max}}$), то необходимо использовать магнитопровод с другими параметрами, в ином случае магнитопровод выбран верно.

$$I_{1\text{max тр}} = \frac{U_1}{2 \cdot f \cdot L_1}, \quad (77)$$

где U_1 – напряжение первичной обмотки, (В);

L_1 – индуктивность первичной обмотки, (Гн).

Диаметр провода первичной обмотки вычисляется из соотношения:

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{\Sigma}^{max}}{J \cdot N}}, \quad (78)$$

где I_{Σ}^{max} – амплитудное значение полного тока первичной обмотки, равное

$$I_{\Sigma}^{max} = I_{1max} + I_{1max\text{ гр}}, \quad (\text{А});$$

N – количество параллельных проводов в обмотке.

Число витков вторичной обмотки вычисляется из соотношения:

$$w_2 = \frac{w_1 \cdot U_H}{U_1}, \quad (79)$$

где U_H – напряжение на нагрузке, (В).

Диаметр провода вторичной обмотки трансформатора вычисляется из соотношения:

$$d_2 = 0,6 \cdot \sqrt{I_H}, \quad (80)$$

где I_H – ток в цепи нагрузки, (А).

Для осуществления проверки произведенных вычислений использовано программное обеспечение (ПО) "Lite-CalcIT Расчет импульсного трансформатора двухтактного преобразователя (Версия 4.1)". Снимок экрана с введенными значениями для разрабатываемого преобразователя изображен на рисунке 45:

Lite-CalcIT - Расчет импульсного трансформатора двухтактного преобразователя (Версия 4.1)

Помощь О программе...

Схемы преобразования

Управление

● Пуш-пул ○ Полумостовая ○ Мостовая

Напряжение питания

● Постоянное ○ Переменное Диапазон (мин., ном., макс.), В 25 30 35

Тип контроллера ШИМ и частота преобразования

● TL494 и ему подобные ○ IR2153, SG3525 и им подобные Частота преобразования 80 кГц

Характеристики преобразователя

Номинальное напряжение, В 21

Номинальная мощность, Вт 225

Диаметр провода (желазный), мм 2 2 0,63 0,63 0,63

Использовать желаемые диаметры

Выпрямление:

Однополярн. со средней точкой

Двухполярн. со средней точкой

Мостовое

Стабилизация выходов Есть Нет

Принудительное воздушное охлаждение (вентилятор) Есть Нет

Схемы выпрямления

Однополярная со средней точкой

Двухполярная со средней точкой

Мостовая

Сердечник

Сердечник: R 40/25/22

Выбор сердечника

Материал: N87 Ercos

Результаты расчета

Индукция, максимальная 0.130 Т

Мощность потерь в магнитопроводе 1.567 Вт

Габаритная мощность трансформатора 1223.9 Вт

Потребляемая нагрузкой мощность 225.0 Вт

Коэффициент заполнения окна 0.128

Индуктивность первичной обмотки 0.112 мГн

Ток намагничивания первичной обмотки 0.604 А

Амплитуда тока первичной обмотки 11.372 А

Ток потребления (по шине DC) 7.911 А

Число витков первичной обмотки 5+5

Диаметр провода первичной обмотки 2x1

Допустимый диаметр проводов не более 0.67 мм

Выходные характеристики

Число витков	Диаметр мм	Напр. мин, В	Напр. ном, В	Напр. макс, В	Индуктивность дросселя, мкГн
1.	5+5	2x1	21.0	16.71	
2.					
3.					
4.					

Рассчитать Выход

Рисунок 45 – Поверочный расчет трансформатора для инверторного преобразователя в ПО "Lite-CalcIT"

На рисунке 46 изображен процесс намотки высокочастотного импульсного трансформатора и его установка в инверторный преобразователь:



А



Б

Рисунок 46 – Высокочастотный импульсный трансформатор (А – процесс намотки, Б – установка в инверторный преобразователь)

В качестве драйвера в преобразователе первоначально была использована микросхема IR2113 в комбинации с дополнительными полевыми транзисторами, однако практические исследования показали, что

использование микросхемы уменьшает эффективность. Связано это с тем, что переключение выходных транзисторов микросхемы происходит с некоторыми задержками (t_r и t_f), переключение транзисторов также переходит с задержками, вследствие этого фронт импульса на трансформаторе получается короче. Разработанная схема драйвера с силовыми выходными транзисторами представлена в соответствии с рисунком 47:

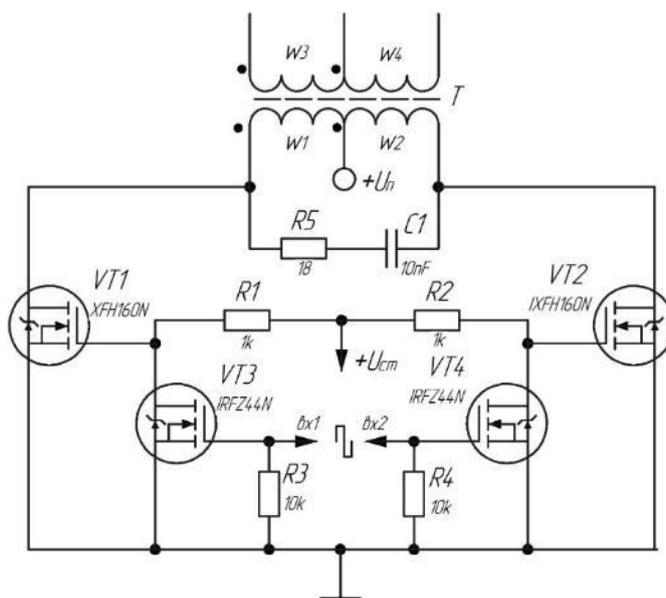


Рисунок 47 – Схема выходной части инверторного преобразователя с драйвером

Особенностью данной схемы является то, что выходные силовые транзисторы (VT1 и VT2) работают в инвертированном режиме. Таким образом, импульсы сигналов управления их не открывают, а закрывают. Это позволяет уменьшить время коммутации и увеличить эффективность, что было подтверждено на практике.

Принцип работы схемы заключается в том, что транзисторы VT1 и VT2 переходят в состояние насыщения в результате подачи на их затворы положительного потенциала через резисторы R1 и R2. Запирание этих транзисторов производится поочередно, в результате попеременного открытия управляющих транзисторов VT3 и VT4. Управление этими транзисторами осуществляется при помощи устройства управления. Резистор

R5 с конденсатором C1 необходимы для демпфирования колебаний первичной цепи.

В качестве устройства управления в данном преобразователе использован программируемый микроконтроллер ATmega 328. Его использование вместо специализированной микросхемы обусловлено тем, что разрабатываемое устройство является лабораторным макетом, выполняющим роль прототипа серийной установки. В связи с этим, основные задачи, поставленные перед устройством, заключаются в практической реализации способа повышения эффективности отбора электрической энергии от массивов фотоэлектрических модулей, а также настройка и отладка основных функциональных элементов с целью достижения максимальной эффективности их работы. Для решения этих задач, использование контроллера представляется достаточно удобным решением, позволяющим программно изменять частоту переключения и различные режимы работы, встроенный АЦП позволяет подключать датчики для осуществления обратной связи и защиты от КЗ.

При программировании микроконтроллера необходимо учитывать, что силовые транзисторы работают в инвертированном режиме. Вследствие этого, для предотвращения прохождения сквозного тока через транзисторы, обеспечение защитной паузы (dead time), необходимо осуществить не отсутствием управляющих импульсов, а, наоборот, наличием управляющего импульса на каждом выходе. Программно это выглядит следующим образом:

```
while (1) {
    PORTD &= ~(1 << 2); // низкий уровень на выводе PD2 (VT 1 - откр.)
    _delay_us(5); // время продолжения фронта импульса на VT1 (5мкс)
    PORTD |= (1 << 2); // высокий уровень на выводе PD2 (VT 1 - закр.)
    _delay_us(1); // защитная пауза (dead time) - 1 мкс
    PORTD &= ~(1 << 4); // низкий уровень на выводе PD 4 (VT 2 - откр.)
    _delay_us(5); // время продолжения фронта импульса на VT 2 (5мкс)
    PORTD |= (1 << 4); // высокий уровень на выводе PD2 (VT 2 - закр.)
    // _delay_us(0); // защитная пауза (dead time) - 1 мкс
}
```

Из программного кода видно, что, несмотря на то, что используется микроконтроллер ATmega 328, программный код написан не на упрощенном языке Wiring, а с использованием прямого обращения к портам. Связанно это с тем, что выполнение таких команд как `digitalWrite()`, `loop ()` и других происходит со значительной задержкой, вследствие чего не возможно получить частоту переключения транзисторов в преобразователе более 18 кГц. Эти задержки происходят из-за дополнительных проверок и команд после выполнения функций.

Разработка и подробное описание устройства управления инверторным преобразователем описано в следующем подразделе, в котором представлено описание разработки ЭВУ УСФМ, из-за их одинакового устройства.

Принципиальная схема разработанного преобразователя представлена на рисунке 48:

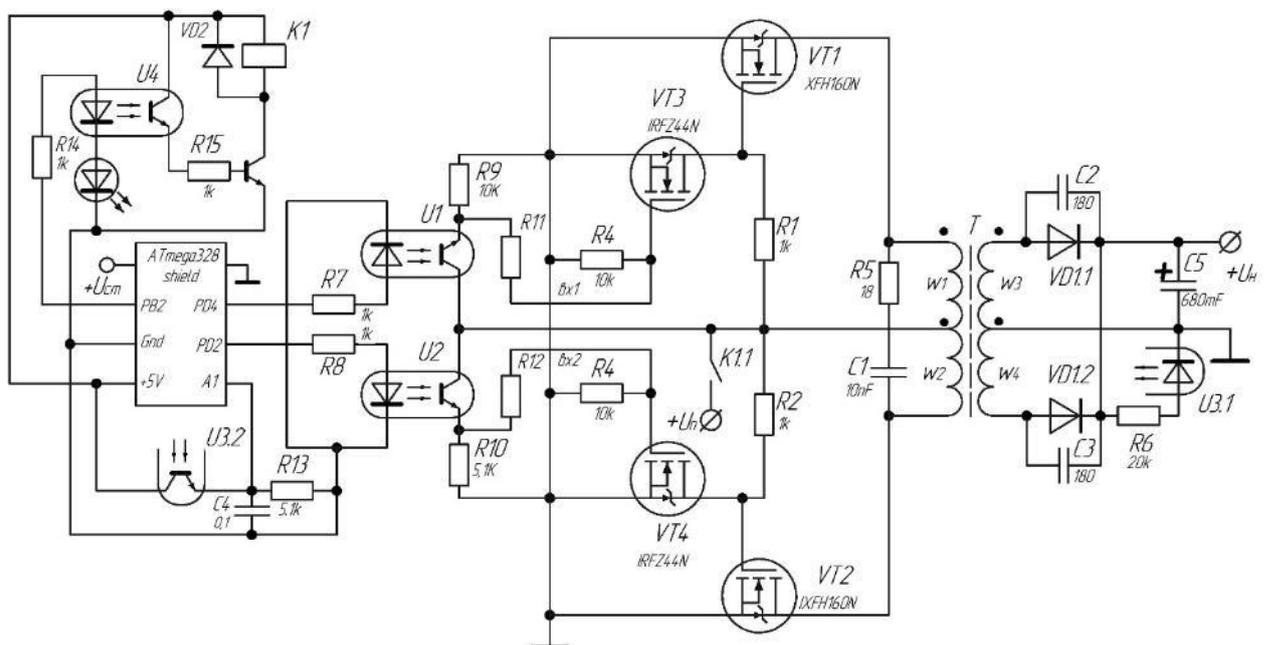


Рисунок 48 – Принципиальная схема инверторного преобразователя

Сигнал обратной связи микроконтроллер получает через оптопару U3.1, которая позволяет получить достаточно высокие характеристики стабильности и быструю реакцию на изменение нагрузки, при этом обеспечивается гальваническая развязка по обратной цепи. Также в схеме, для обеспечения защиты от КЗ и перегрузок предусмотрен блок реле,

размыкающий входное питание в случае перегрузки. Конденсаторы С2 и С3 являются демпфирующими элементами. Необходимость их установки вызвана тем, что вторичная обмотка трансформатора с проходными емкостями диодов VD1.1 и VD1.2 образует колебательное звено, рождающее выбросы напряжения в моменты переключения транзисторов VT1 и VT2, являющиеся источниками радиопомех.

3.3.3 Разработка электронно-вычислительного устройства

Для осуществления разработанного способа, в устройстве необходим элемент, способный производить автоматический анализ уровня рассогласования и подбирать необходимое напряжение «добавки» фотоэлектрического модуля.

Вследствие того, что с течением дня и временем года солнечная активность, приходящая на солнечные элементы не постоянна, а также присутствие фактора загрязнения, осадков и выхода из строя части элементов, приводят к тому, что уровень рассогласованности массивов фотоэлектрических модулей постоянно изменяется. Это обстоятельство приводит к тому, что устройство должно достаточно оперативно производить автоматическую перенастройку для достижения максимальной энергоэффективности солнечной установки. Также оно должно отслеживать работоспособность модулей, и осуществлять аналитику основных электрических параметров.

Сравнительный анализ показал, что наиболее целесообразным представляется использование в устройстве микроконтроллера фирмы Atmel – Atmega 328p. Это связано с тем, что такой контроллер имеет встроенный десятиразрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), расширенную систему команд и периферийных устройств, а также низкую стоимость [97]. Кроме того, разработку программного обеспечения для контроллера, при использовании платформы, можно производить в бесплатной среде

разработки Arduino IDE, имеющей множество библиотек, упрощающих работу с внешними устройствами и имеет упрощенный язык программирования Wiring.

Для обеспечения связи с компьютером, электронно-вычислительное устройство включает микросхему FT232RL, представляющую преобразователь USB-UART. На рисунке 49 изображена схема соединения микросхемы к USB порту:

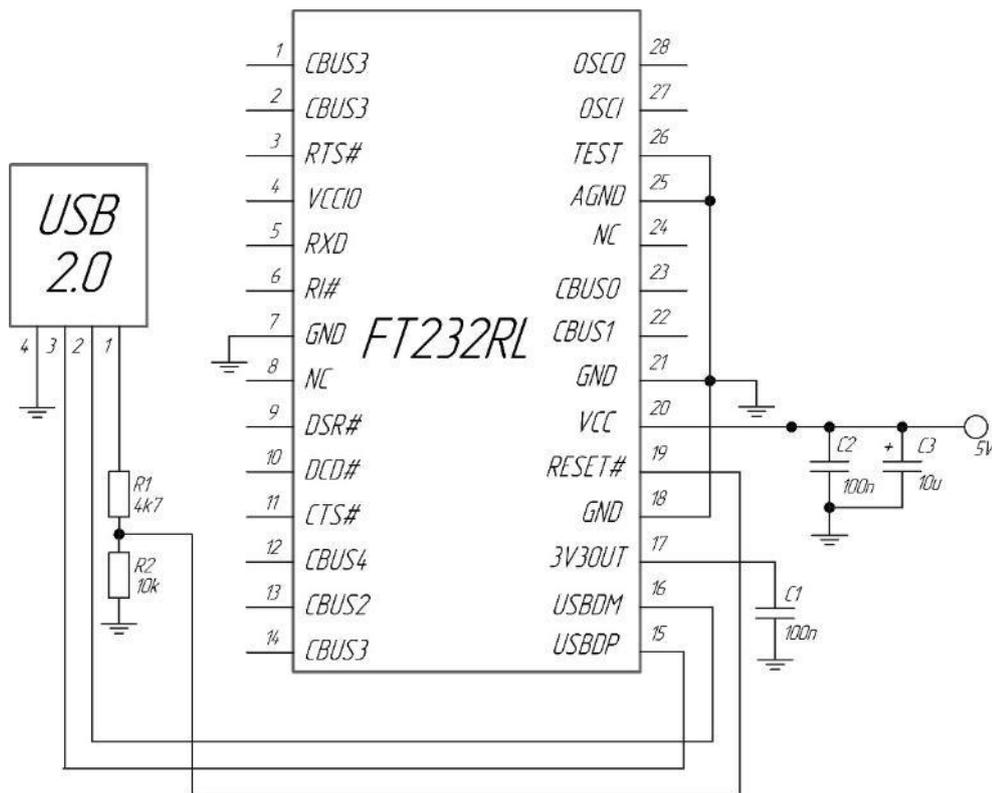


Рисунок 49 – Схема соединения микросхемы FT232RL к USB порту

Питание микроконтроллера и интерфейсной микросхемы, а также некоторых датчиков и индикаторов осуществляется через стабилизатор напряжения, основным элементом которого, является линейный стабилизатор напряжения LM7805СТ, включающий схему ограничения тока, тепловую защиту и защиту рабочей зоны. Принципиальная схема стабилизатора показана на рисунке 50:

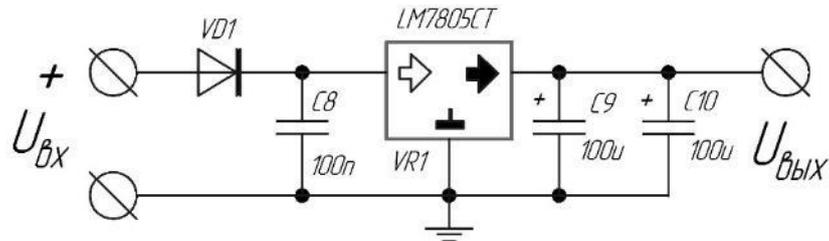


Рисунок 50 – Схема стабилизатора напряжения

Одной из задач, решаемых при разработке принципиальной схемы, была задача размещения всех элементов на односторонней печатной плате для уменьшения стоимости и упрощения сборки. Принципиальная схема ЭВУ изображена в соответствии с рисунком 51:

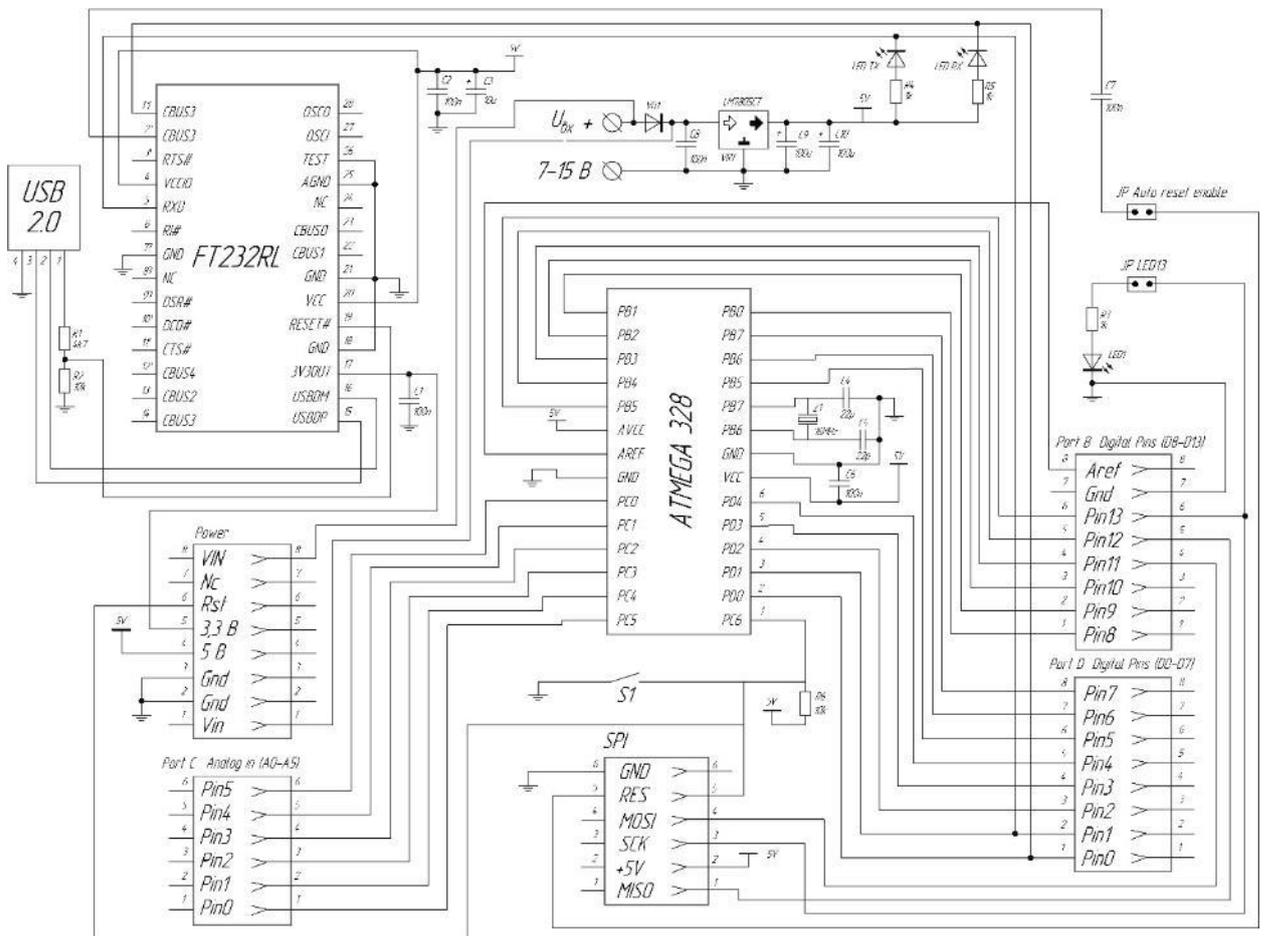


Рисунок 51 – Принципиальная схема ЭВУ

Для возможности работы в среде Arduino, необходимо прошить загрузчик (bootloader) в память микроконтроллера. Этот процесс осуществляется при помощи программатора USBasp и среды Arduino IDE способом, описанным в [98].

3.3.4 Разработка понижающего DC-DC преобразователя

Разработанный повышающий DC-DC преобразователь по бустерной схеме не позволяет получить выходное напряжение ниже напряжения, подаваемое на его вход от инверторного преобразователя. Однако, в ряде случаев, напряжение рассогласования будет ниже значения напряжения на выходе инвертора. Примером такого случая может быть шунтирование одной, или двух групп солнечных элементов в фотоэлектрическом модуле в результате загрязнения, затенения, или выходе из строя. Так как большинство промышленных модулей состоит из трех последовательных групп солнечных элементов, параллельно которым установлены шунтирующие диоды, при загрязнении, или затенении любого элемента из группы, происходит шунтирование группы диодом. Поэтому, при отключении одной, или двух групп, напряжение рассогласования составит $1/3$, или $2/3$ напряжения модуля, а это значение меньше значения на выходе инверторного преобразователя. Стоит отметить, что в этом случае, значение теряемой мощности будет не столь значительным при использовании достаточно большого количества фотоэлектрических панелей в модуле, но при их небольшом количестве (от 1 до 4) потери могут составлять от 30 до 90 %. Вследствие того, что на разрабатываемое устройство возлагаются функции исследовательской лабораторной установки, необходимо, чтобы в нем были реализованы различные возможности работы с СФУ при различных режимах, в том числе и с установками, состоящими из небольшого количества фотоэлектрических модулей, и в условиях с небольшим значением напряжения рассогласования. Следовательно, возникает необходимость разработки понижающего DC-DC преобразователя.

Для реализации DC-DC преобразователя была выбрана схема бак-преобразователя (buck converter), его выбор обоснован малыми габаритными размерами и высоким значением КПД. Базовая схема преобразователя изображена на рисунке 52:

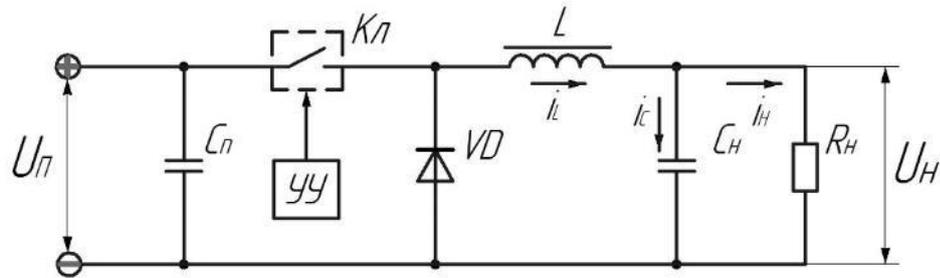


Рисунок 52 – Базовая схема понижающего DC-DC преобразователя

Основными элементами преобразователя являются: ключевой элемент (Кл), осуществляющий высокочастотную коммутацию тока; дроссель (L) и конденсатор C_n , образующие выходной LC-фильтр; разрядный диод (VD); устройство управления, выполняющее функцию стабилизации напряжения нагрузки R_n ; фильтрующий конденсатор C_n .

Принцип его работы заключается в следующем: во время замыкания ключевого элемента, ток проходит через дроссель к нагрузке, параллельно которой подключен конденсатор. В это время происходит накопление энергии и в дросселе, и в конденсаторе, соответственно, ток по мере заряда (I_L - увеличивается). После размыкания ключевого элемента начинается разряд дросселя через диод поддерживая направление и непрерывность тока. Выходной конденсатор сглаживает импульсы на нагрузке. Затем цикл повторяется.

Значение нижней граничной индуктивности дросселя, для обеспечения непрерывности тока, рассчитывается согласно уравнению:

$$L = \frac{(1 - D)R_n}{2f}. \quad (81)$$

Для надёжной работы необходимо увеличить рассчитанное значение нижней граничной индуктивности дросселя на 30-40%.

Пульсации тока в дросселе можно вычислить из соотношения:

$$\Delta I_L = \frac{U_n(1 - D)}{Lf}. \quad (82)$$

Действующее значение тока, текущего через дроссель можно определить по формуле:

$$I_L = \sqrt{I_H^2 + \left(\frac{\Delta I_L}{2\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (83)$$

Количество витков в дросселе определяется следующим выражением:

$$N = 100 \sqrt{\frac{L}{A_L}}, \quad (84)$$

где A_L – коэффициент индуктивности, (мкГн/100витков).

По частоте работы преобразователя, выбирается сердечник. В данном устройстве выбран порошковый тороидальный сердечник Т130-26, имеющие следующие характеристики:

- коэффициент индуктивности $A_L = 810$ мкГн/100 вит;
- длина магнитопровода $l_{мп} = 8,28$ см;
- площадь сечения $S_c = 0,361$ см²;
- объём магнитопровода $V = 2,99$ см³;
- число витков однослойной обмотке при диаметре провода $d = 1,628$ мм² - 32 витка;
- предельно допустимый ток при $d = 1,628$ мм² и перегреве до 30°C $I_{пр} = 12,3$ А.

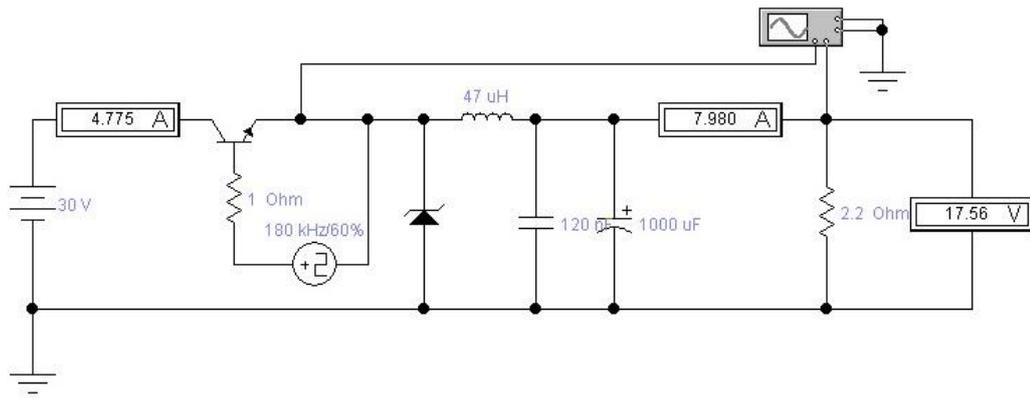
Величина ёмкости сглаживающего конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{1 - D}{16Lf^2k_{п}}, \quad (85)$$

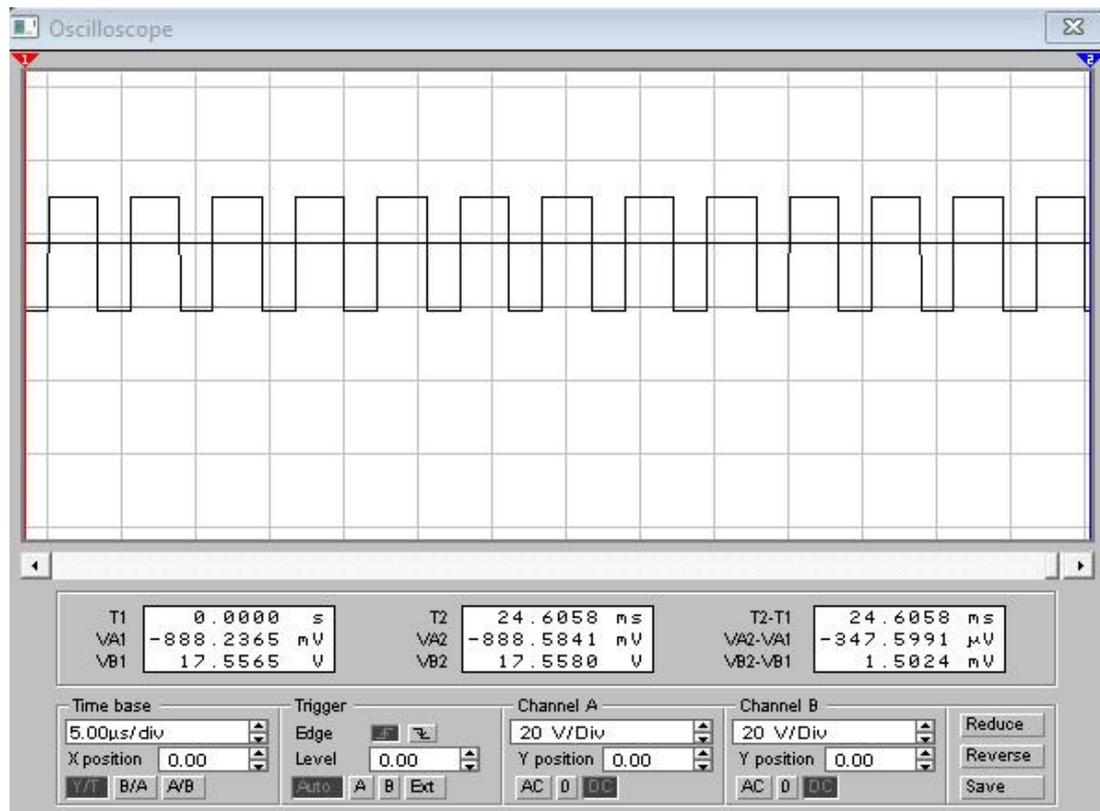
где $k_{п}$ – коэффициент пульсации.

Расчет ключевого элемента и диода производится также, как и в расчете повышающего DC-DC преобразователя, приведенном ранее в данном разделе.

Произведя математические вычисления параметров основных элементов понижающего DC-DC преобразователя производится компьютерное моделирование преобразователя. На рисунке 53а изображен снимок экрана компьютерной модели преобразователя, а на рисунке 53б снимок осциллограммы, иллюстрирующий её работу:



а



б

Рисунок 53 – Компьютерное моделирование понижающего DC-DC преобразователя

Для разработки реальной схемы преобразователя в качестве ключевого элемента, а также его устройства управления была использована микросхема XLSEMI4016E со встроенным выходным мощным полевым транзистором. Данная микросхема предназначена специально для создания на её основе бак-преобразователей. К её достоинствам можно также отнести высокий КПД (до 96%) за счёт высокой частоты работы (180 кГц), достаточно широкий диапазон

входных напряжений (от 8 до 40 В), возможность длительной работы на нагрузку с током 8 А и наличие встроенной защиты от КЗ.

На рисунке 54 изображена принципиальная схема понижающего DC-DC преобразователя:

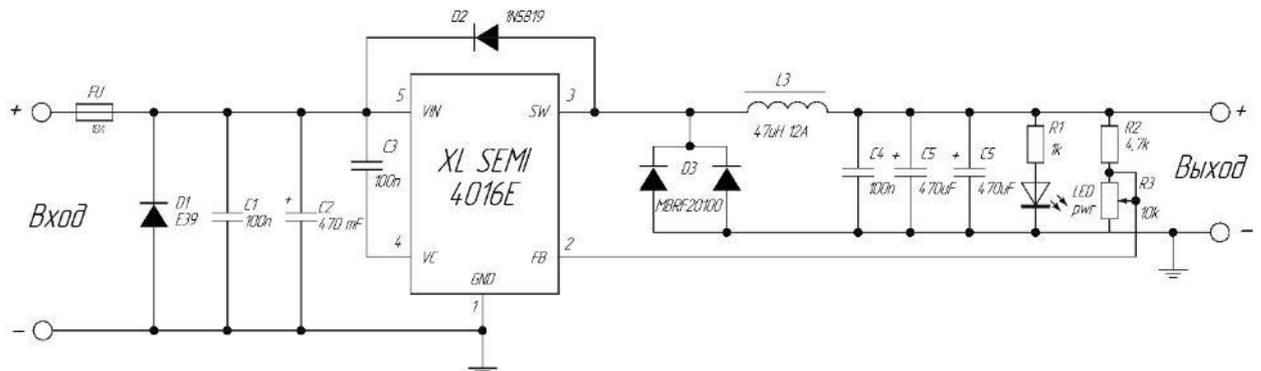


Рисунок 54 – Принципиальная схема понижающего DC-DC преобразователя

Вследствие того, что в преобразователе отсутствует гальваническая развязка, обратная связь с микросхемой, осуществляется при помощи делителя напряжения, образованного резистором R2 и потенциометром R3.

На рисунке 55 изображен общий вид понижающего DC-DC преобразователя, изготовленного по принципиальной схеме, изложенной в данном подразделе:

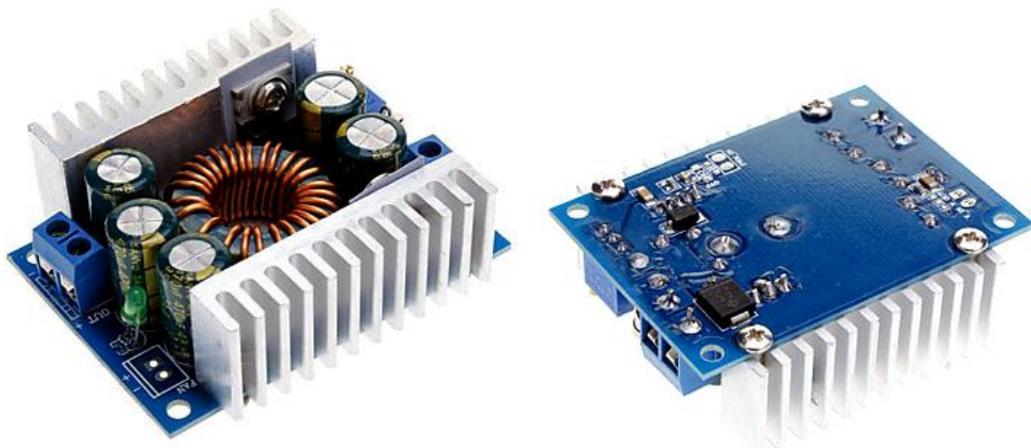


Рисунок 55 – Общий вид понижающего DC-DC преобразователя

Разработанный преобразователь позволяет регулировать выходное напряжение в диапазоне от 2-х до 34 В с максимальной выходной мощностью 250 Вт, что позволяет выполнять согласование массивов фотоэлектрических модулей по разработанному способу при шунтировании от 1/3 до 1 модуля.

3.3.5 Разработка вспомогательных элементов

Основным электрическим параметром, необходимыми для реализации разработанного способа является сила тока, проходящая через последовательно-соединенные фотоэлектрические модули. На основе его значения устройство также определяет работоспособность массива фотоэлектрических модулей. Для получения этого параметра в разрабатываемом устройстве использован интегральный датчик тока фирмы Allegro - ACS712. Главными достоинствами этого датчика являются – гальваническая развязка между силовой цепью и контроллером и отсутствие температурной зависимости. Принцип работы датчика основан на эффекте Холла - протекающий через проводник электрический ток создает магнитное поле, воспринимаемое встроенным в кристалл элементом Холла. Величина магнитного поля линейно зависит от силы проходящего тока. Встроенный в микросхему формирователь сигнала фильтрует создаваемое чувствительным элементом напряжение и усиливает его до уровня, достаточного для АЦП [4].

На рисунке 56 изображена схема включения датчика тока ACS712:

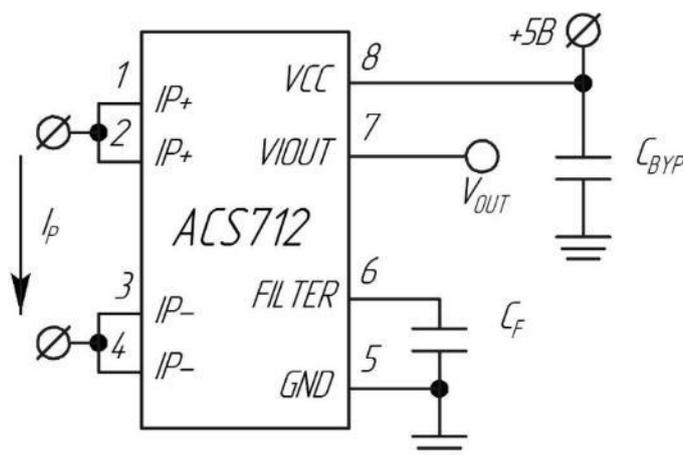


Рисунок 56 – Схема включения датчика тока

Для улучшения соотношения сигнал-шум на выходе датчика предусмотрен RC фильтр, но так как ACS712 содержит встроенный резистор, доступный на 6-м выводе микросхемы, в схему включен только внешний конденсатор C_F .

При анализе выходных параметров датчика наблюдался большой разброс выходных значений, связанных с его чувствительностью. Исследования показали, что для получения наиболее оптимального значения необходимо повторить цикл измерения не менее 500 раз с нахождением среднего арифметического значения. Программный код выглядит следующим образом:

```
for (int i=0; i<500; i++){ //оператор повторения цикла (500 раз)
x = 0.0264*(analogRead(z)-510); //измерение мгновенного значения тока
y += x; //суммирование мгновенных значений тока
}
I = y/500; // нахождение среднего арифметического
```

На рисунке 57 изображен общий вид датчика ACS712, использованного в интеллектуальном устройстве отбора максимальной мощности и согласования фотоэлектрических модулей солнечной электростанции:



Рисунок 57 – Датчик тока ACS712

Данный датчик способен измерять ток величиной до 20 А, что гарантирует надежную работу практически на любой солнечной электростанции, где номинальный ток фотоэлектрических модулей редко превышает 8 А.

Для контроля напряжения и вычисления эффективности работы устройства, разрабатываемое устройство включает датчик напряжения, принципиальная схема которого изображена на рисунке 58:

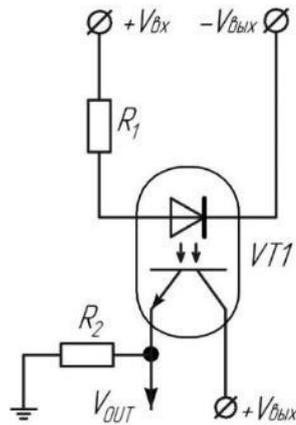


Рисунок 58 – Схема датчика напряжения

Датчик состоит из двух гальванически изолированных цепей: измерительной, состоящей из ограничительного резистора R_1 и светодиода транзисторной оптопары, и информационной, состоящей из ограничительного резистора R_2 и фототранзистора оптопары. Принцип работы датчика заключается в преобразовании входного напряжения в диапазоне от 0 до 800 В, в соответствующее выходное напряжение, находящееся в диапазоне входного диапазона АЦП контроллера (от 0 до 5В). Датчик, обладает высокой точностью измерений (с погрешностью, не превышающей 0,5%) и в реальном времени снабжает систему о параметрах необходимых микроконтроллеру в широком диапазоне измерений.

На рисунке 59 представлен график зависимости выходного напряжения датчика от входного, полученный в результате экспериментального исследования его работы:

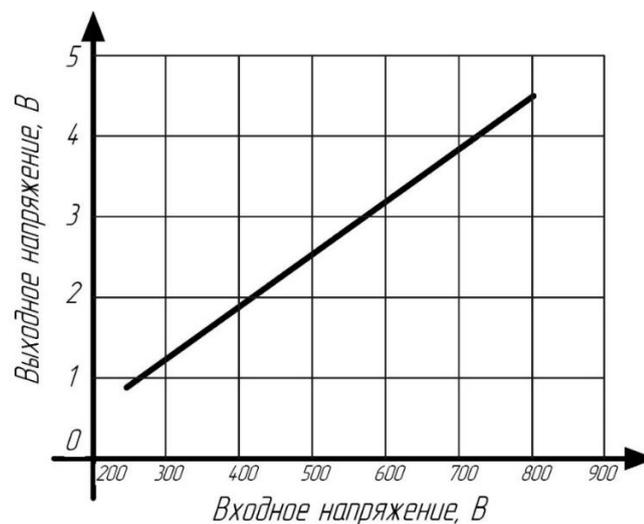


Рисунок 59 – График зависимости выходного напряжения датчика от входного

Из рисунка видно, что изменение выходного напряжения происходит по линейной зависимости от входного по закону, описываемого уравнением:

$$U_{\text{вых}} = 0,06 \cdot U_{\text{вх}} - 0,73, \quad (86)$$

где $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение датчика, В;

$U_{\text{вх}}$ – входное (измеряемое) напряжение датчика, В.

Учитывая разрядность АЦП контроллера программный код для работы датчика выглядит следующим образом:

```
x = analogRead(z2); // измерение "сырого" значения напряжения
U = (x+149)/12.24; // нахождение истинного значения
delay (500); // пауза 0,5 с
lcd.print(x); // вывод значения напряжения
```

Для управления понижающим и повышающим преобразователями, посредством ЭВУ, используется свойство транзисторной оптопары изменять активное сопротивление коллекторно-эмиттерного перехода фототранзистора при освещении его светодионом. Управление яркостью светодиода оптопары осуществляется при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ), используя стандартную функцию - analogWrite(). Исследования показали, что использование оптопары, вместо регулирующего потенциометра, в схемах DC-DC преобразователей требуют обязательного наличия, параллельно соединенного, конденсатора емкостью от 1 до 5мкФ, для сохранения значения напряжения на фототранзисторе во время переходных процессов, возникающих в случае изменения характера нагрузки в сторону увеличения. Использование конденсаторов большей емкости, приводит к увеличению времени изменения сопротивления фототранзистора, из-за чего процесс регулировки становится более инертным. Также для корректной работы схемы управления ключевым элементом, в схеме DC-DC преобразователя необходимо параллельно оптопаре включить резистор со значением сопротивления от 100 до 150 кОм.

Принципиальная схема регулировочного звена DC-DC преобразователя изображена на рисунке 60:

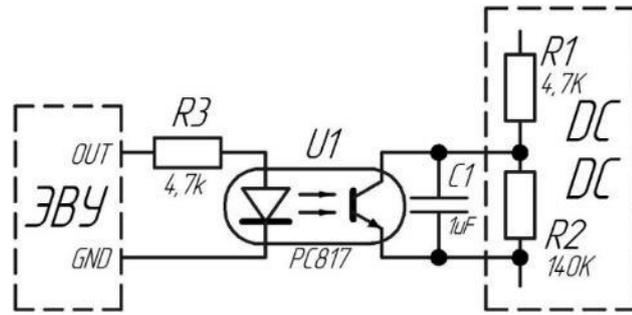


Рисунок 60 – Схема звена управления DC-DC преобразователем

Для надежной, корректной работы ЭВУ и датчиков необходимо их обеспечить стабилизированным питанием со значением напряжения, входящим в рабочий диапазон ЭВУ. Для выполнения этой задачи, в схеме установлен импульсный стабилизатор напряжения, представляющий бак-преобразователь, работающий по тому же принципу, что и рассчитанный ранее, но имеющий меньшую мощность. На рисунке 61 изображена принципиальная схема стабилизатора напряжения:

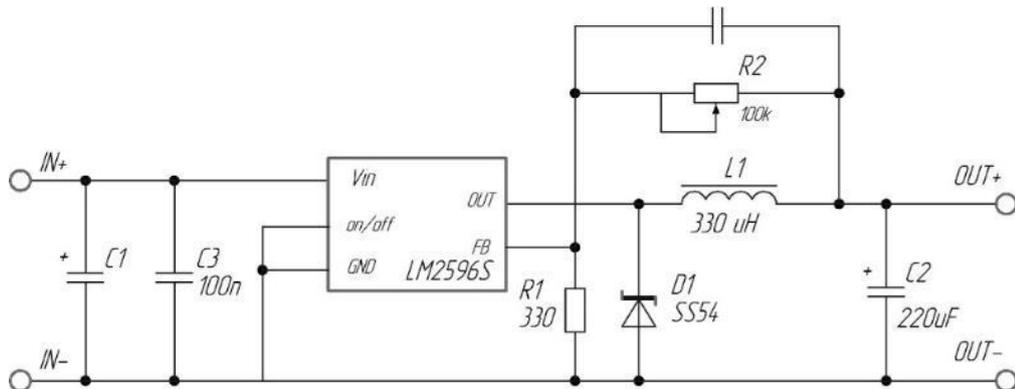


Рисунок 61 – Стабилизатор напряжения

Стабилизатор построен на микросхеме LM2596s. Выбор этой микросхемы для стабилизатора обоснован достаточно высоким КПД (до 95%) и наличием требуемых электрических характеристик [110].

Для коммутации инверторного преобразователя с целью обеспечения защиты в устройстве имеется модуль реле. Принципиальная схема и общий вид этого модуля изображены на рисунке 62:

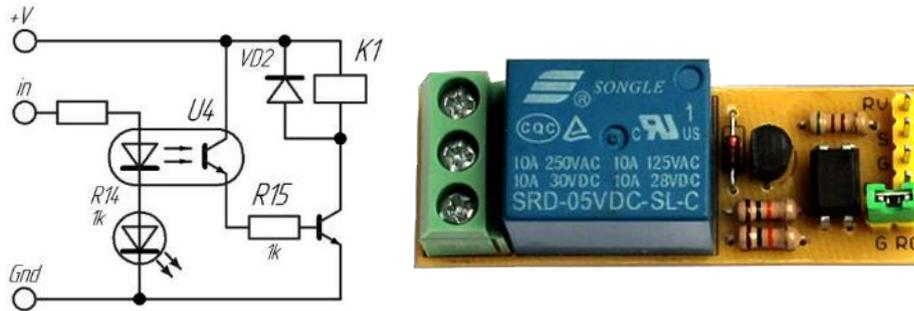


Рисунок 62 – Модуль реле

3.3.6 Построение принципиальной схемы УСФМ

На основании разработанной функциональной схемы и разработанных принципиальных схем функциональных элементов, построена принципиальная схема УСФМ, изображенная на рисунке 63. На основании этой схемы была проведена опытно-конструкторская работа, связанная со сборкой макетного образца устройства.

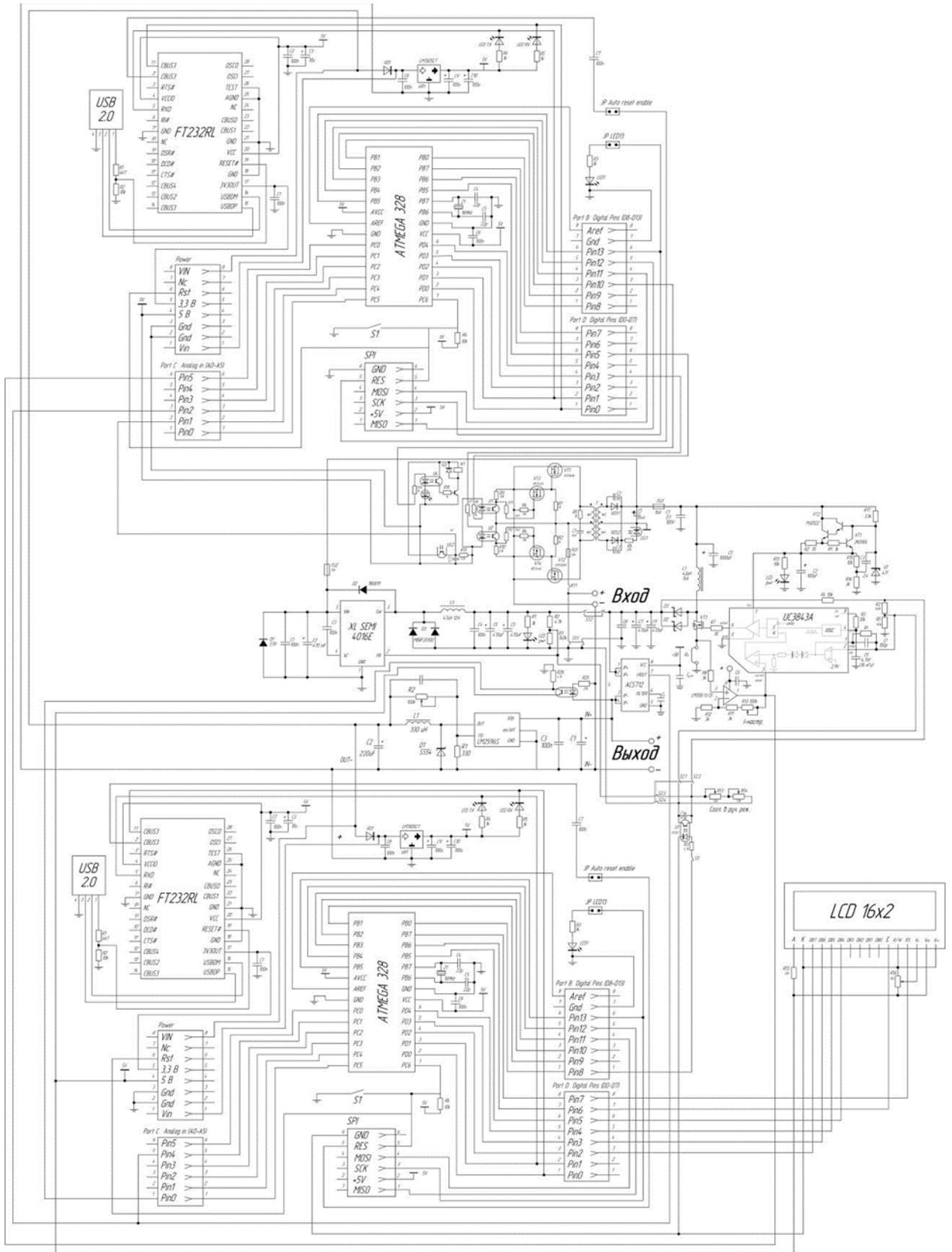


Рисунок 63 – Принципиальная схема УСФМ

3.3.7 Алгоритм работы ЭВУ

На рисунке 64 изображен алгоритм работы ЭВУ, основанный на методе "Возмущение и наблюдение". Согласно алгоритму, устройство определяет значение "добавки" напряжения, равное значению напряжения рассогласования, при котором отбор мощности будет наибольшим. При этом осуществляется постоянный контроль, и анализ параметров от датчиков, а также производятся необходимые вычисления для определения энергетических характеристик и вывод на дисплей информации.

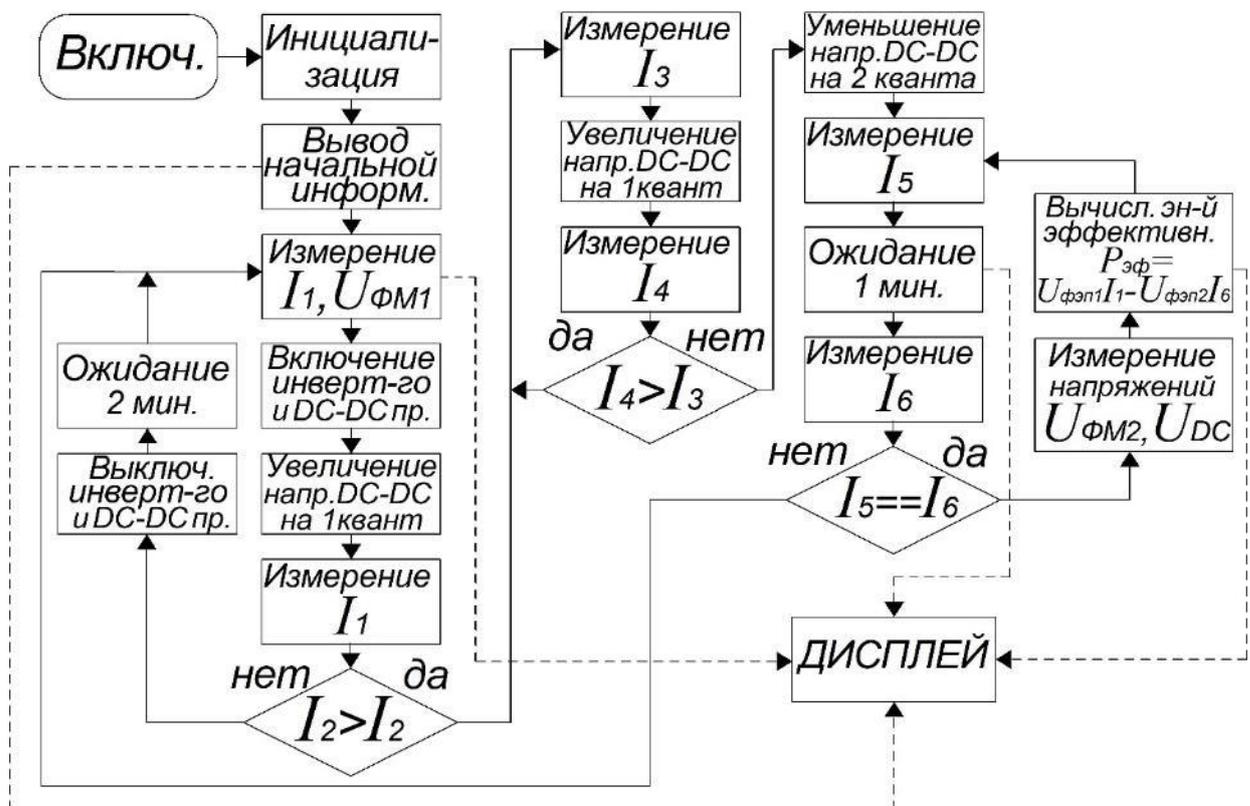


Рисунок 64 – Алгоритм работы ЭВУ

(I_1, I_2, \dots, I_6 – токи массива фотоэлектрических модулей при различных напряжениях на выходе УСФМ; $U_{фм1}, U_{фм2}$ – напряжения массива фотоэлектрических модулей до и после регулирования УСФМ; U_{DC} – напряжение на выходе УСФМ)

3.4 Разработка макетного и полупромышленного образца УСФМ

Для выявления основных закономерностей в процессах работы устройства при различных режимах работы целесообразно проводить исследования на макетном образце, с возможностью осуществлять

дополнительные регулировки и настройки в ручном режиме. Такие исследования значительно снижают стоимость и сроки создания промышленного образца устройства. В данном подразделе представлены результаты опытно-конструкторской работы по разработке и сборке макетного образца устройства на основе его принципиальной схемы.

При разработке макетного образца устройства, была выбрана модульная структура. Достоинствами такого решения стали возможность замены отдельных функциональных элементов, упрощение поиска, устранения неисправности и отладки устройства. Отдельное внимание уделено размещению компонентов в корпусе, для обеспечения удобного доступа к каждому из них с целью регулировки и возможности простого снятия, или установки.

Для мониторинга электрических и энергетических показателей работы устройства и массивов фотоэлектрических модулей, а также сбора аналитических данных о повышении эффективности в результате его работы, на лицевой панели установлен двухстрочный жидкокристаллический дисплей. На рисунке 65 изображена структура отображения данных на дисплее:



Рисунок 65– Структура отображения данных на дисплее

В верхней строке дисплея отображается автоматически выбранный ЭВУ режим работы, определяемый степенью рассогласованности фотоэлектрических модулей (от 0 до 9) и значение эффективности его работы, показывающее в зависимости от установленной настройки в программе ЭВУ или значение дополнительно полученной электрической энергии, в результате работы устройства в течении светового дня с момента его включения (в Вт·ч),

или мгновенное значение прибавки мощности (в Вт). Во второй строке отображается текущее значение тока фотоэлектрического модуля (в $A \cdot 10^{-2}$) и значение напряжения "добавки" (в В).

Для возможности осуществления согласования фотоэлектрических модулей, настройки и переключения режимов работы в ручном режиме, на лицевой панели установлены два переключателя и две рукоятки регуляторов.

Для подключения устройства к СФУ с тыльной стороны расположены две пары зажимных винтов-розеток – горизонтальная и вертикальная. К вертикальным подключаются соединительные провода от фотоэлектрического модуля, к горизонтальным – провода из соединительной коробки.

Для обеспечения охлаждения силовых элементов, на тыльной перегородке с наружной и внутренней стороны предусмотрены радиаторы охлаждения и вентиляционные отверстия в верхней крышке для удаления нагретого воздуха.

На рисунке 66 показано размещение функциональных элементов в корпусе устройства:

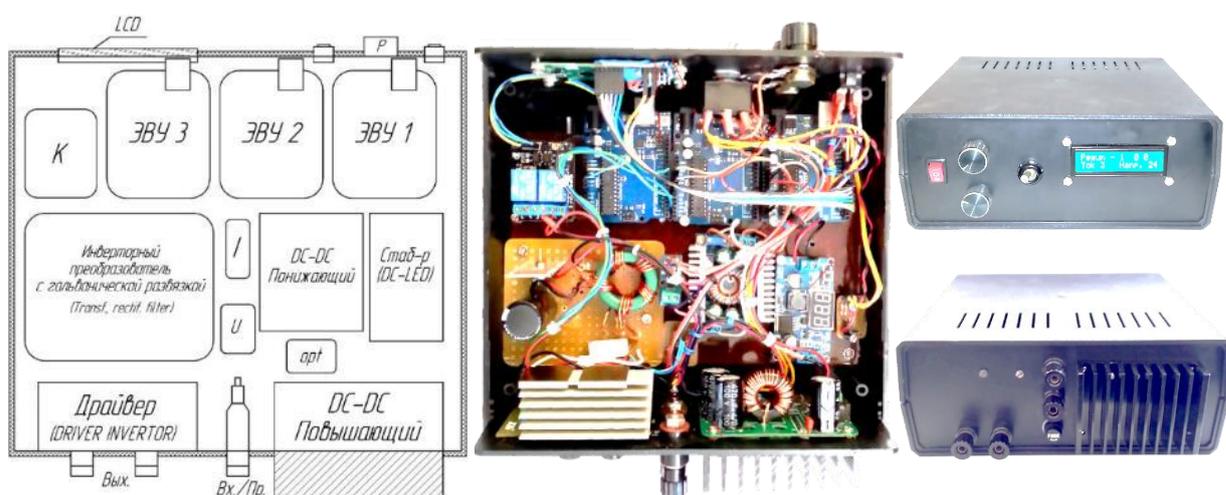


Рисунок 66 – Размещение функциональных элементов в корпусе устройства

После проведения ряда испытаний макетного образца, а также окончания работ по его отладке и настройке была проведена работа по

созданию полупромышленного образца устройства для его долговременного использования и внедрения на промышленных солнечных электростанциях. Согласно разработанной технической документации на фирме ShenZhen Sun-Lite Technology Co.,Ltd [124] была изготовлена печатная плата и произведена сборка устройства в корпусе высокочастотного импульсного блока питания, выпускаемого этой фирмой. Основным схемным отличием полупромышленного образца устройства от макетного образца является входной импульсный инверторный преобразователь, рассчитанный на входное напряжение до 600 В. Данный преобразователь построен на IGBT транзисторах FGA25N120ANTD [103]. Также в полупромышленном образце отсутствует индикация и возможность осуществления ручной регулировки выходного напряжения.

На рисунке 67 представлен общий вид разработанного УСФМ, а в таблице 6 представлены его технические характеристики.

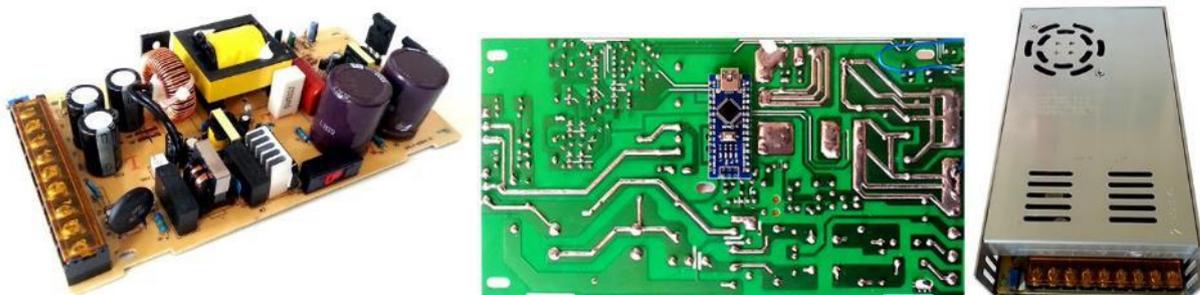


Рисунок 67 – Полупромышленный образец УСФМ

Таблица 6 – Характеристики полупромышленного образца УСФМ

Входное напряжение (напряжение одного параллельного массива модулей)	70 - 700 В
Максимальный выходной ток (максимальный массива фотоэлектрических модулей)	10 А
Диапазон напряжений согласования	1 – 90 В
Максимальная выходная мощность	600 Вт

Продолжение таблицы 6

КПД (В режиме согласования)	96 %
Потребляемая мощность (в режиме ожидания)	< 1 Вт
Диапазон рабочих температур	-30 ... +60 °С
Время выполнения алгоритма согласования	< 4 с

Выводы по разделу:

Изобретен способ повышения эффективности отбора электрической энергии от параллельно соединенных массивов фотоэлектрических модулей с различными напряжениями, или затенении, загрязнении, неисправности одного, или нескольких модулей. Способ заключается в их согласовании, посредством последовательного включения в них дополнительного элемента питания с изменяемыми электрическими характеристиками, номинал которых устанавливается электронным вычислительным устройством из соображения получения максимальной мощности. Электрическая энергия в дополнительный источник питания подается от этих же массивов фотоэлектрических модулей, через устройство обеспечивающее гальваническую развязку, или от любого другого источника электрической энергии. Важной особенностью данного способа является то, что для согласования модулей не требуется преобразование всей вырабатываемой ими электрической энергии, а лишь её небольшой части, определяемой уровнем рассогласованности.

Разработан экспериментальный макет и опытный образец устройства отбора максимальной мощности и согласования фотоэлектрических модулей, реализующие изобретенный способ. Устройство позволяет в автоматическом и ручном режиме выполнять согласование модулей в диапазоне расхождения напряжения 2-90 В с выходным током до 9 А, что соответствует 9-ти шунтированным группам, или 3-м серийным фотоэлектрическим панелям

типа KV-260, PS-250, KV-245 и др., используемыми на большинстве промышленных солнечных электростанций. На основе разработанного макетного образца устройства изготовлен полупромышленный образец УСФМ готовый для внедрения на промышленных солнечных электростанциях с максимальным выходным напряжением массивов модулей до 600 В.

РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СФУ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Цель проведения экспериментального исследования заключается в проверке адекватности разработанных математических моделей и подтверждении результатов теоретических исследований. Также необходимо отметить, что разработка устройства отбора максимальной мощности и согласования массивов фотоэлектрических модулей для внедрения на промышленной солнечной электростанции требует не только понимания физических принципов его работы и использования математического аппарата для моделирования процессов, происходящих в нем, но и экспериментальных данных, полученных при испытаниях. В случае отсутствия экспериментальных данных, создание промышленного образца установки становится долговременным и достаточно дорогостоящим мероприятием. Большое количество взаимозависимых факторов часто делает невозможным прогнозирование поведения устройства в реальных условиях и проведение математического моделирования.

Для выявления основных закономерностей в процессе работы устройства при различных режимах целесообразно проводить исследования на макетном образце устройства, с возможностью осуществлять дополнительные регулировки и настройки в ручном режиме. Такие исследования значительно снижают стоимость и сроки создания промышленного образца устройства.

Экспериментальные исследования были выполнены на действующих солнечных электростанциях и установках г. Севастополя (ООО «С. Энерджи-Севастополь») установленной мощностью 2,99 МВт, Республики Крым (ООО «НПФ «Спецстройпроект»), установленной мощностью 9 кВт, г. Самары (ООО «Эко Энерджи») и в лаборатории «Возобновляемые источники энергии» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Экспериментальные исследования были проведены согласно [37,56] по следующему плану:

1. Разработка методики проведения экспериментов.
2. Выбор оборудования, приспособлений, контрольно-измерительной аппаратуры, разработка информационно-измерительного комплекса для отображения, регистрации и хранения измерительной информации.
3. Изготовление лабораторных фотоэлектрических установок и дополнительных технических средств, отвечающим требованиям методике проведения экспериментов.
4. Проведение эксперимента. Получение экспериментальных данных с фотоэлектрической установки.
5. Анализ полученных данных и их сопоставление с теоретическими результатами. Формулировка выводов.

4.1 Средства измерения и контроля

Снятие ВАХ осуществлялось одновременно с измерением интенсивности солнечного освещения на поверхности солнечных элементов и температур окружающей среды и солнечных элементов. Измерения проводились при естественном солнечном свете в ясный солнечный день согласно [17,21] на широте $44^{\circ} 37.0012'$ с.ш. (г. Севастополь).

Снятие ВАХ классическим способом, используя амперметр, вольтметр и реостат в качестве нагрузки, занимает довольно большое количество времени. Вследствие этого уменьшается точность полученных данных в полевых условиях. Это происходит из-за изменяющихся параметров солнечных элементов в процессе измерения в результате их нагрева от воздействия энергии солнца, или охлаждения, вследствие конвективного уноса тепла ветром и др. Также такие измерения являются не очень удобными,

так как требуют одновременного ручного изменения нагрузки и регистрации данных с приборов.

В связи с изложенным, для снятия ВАХ на лабораторных фотоэлектрических установках, был разработан информационно-измерительный комплекс (ИИК), позволяющий в автоматическом режиме производить изменение нагрузки с измерением, регистрацией и отображением в графическом виде значений напряжения и тока. Кроме того, данный комплекс позволяет измерять и регистрировать температуру окружающей среды и поверхности солнечных элементов пирометрическим методом, а также интенсивность солнечного излучения.

Структурная схема ИИК изображена на рисунке 68:

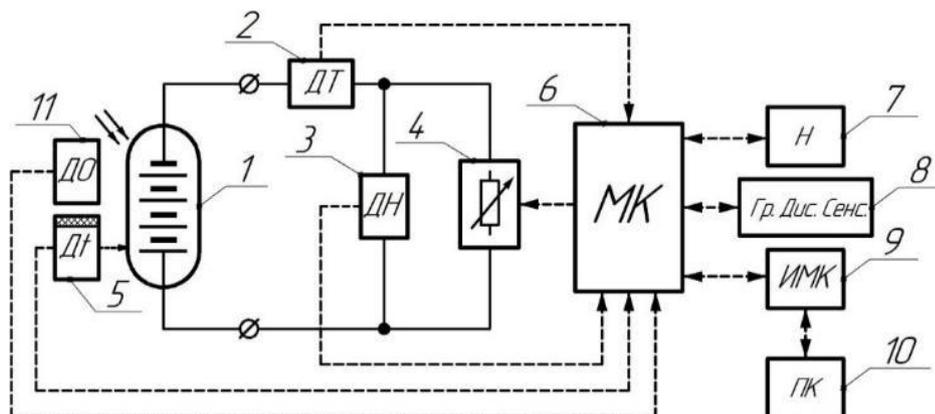


Рисунок 68 – Структурная схема ИИК

(1 – СФУ; 2 – датчик тока; 3 – датчик напряжения; 4 – специальная регулируемая нагрузка; 5 – датчик температуры солнечного элемента и ОС; 6 – микроконтроллер; 7 – электронный накопитель; 8 – интерфейсный микроконтроллер; 9 – персональный компьютер; 10 – датчик освещенности)

Принцип работы ИИК заключается в том, что микроконтроллером (МК) (6) производится автоматическое пошаговое изменение нагрузки солнечного элемента (1) посредством специальной регулируемой нагрузки (4). Каждое изменение нагрузки сопровождается циклом измерений тока и напряжения посредством датчиков напряжения (3) и тока (2), передающие информацию в АЦП МК. Количество измерений в одном цикле составляет 500. Кроме того, МК получает информацию о температуре окружающей среды, температуре солнечных элементов и освещенности, посредством датчиков температуры (5)

и освещенности (11). МК преобразует измерительные сигналы, сохраняет их в электронном накопителе (7), выводит на экране графического сенсорного дисплея (8) в графическом и текстовом виде. На экране дисплея также выводится информация о значениях мощности, напряжения и тока в ТАМ, определяемая алгоритмом поиска ТММ в МК, значения тока и напряжения в точках ХХ и КЗ, последовательном сопротивлении СФУ. Значения температуры окружающей среды и поверхности солнечных элементов отображаются в графическом и текстовом виде в отдельном окне на экране дисплея, переключаемом посредством сенсорного управления на дисплее. Значения освещенности на поверхности также выводятся в отдельном окне дисплея. Для анализа и хранения измерительной информации на персональном компьютере (ПК), в комплексе предусмотрен интерфейсный МК (9), который посредством последовательного порта передает пакеты данных в ПК (10).

В качестве датчика тока используется интегральный датчик тока фирмы Allegro - ACS712 такой же, как и в УСФМ, описанный в 3-м разделе. Измерение напряжения производится делителем напряжения, рассчитанным исходя из максимального напряжения СФУ лабораторной установки с запасом 25% – 140 В и максимального напряжения на входе АЦП МК – 5 В.

Тарировка датчиков напряжения и тока производилась цифровым мультиметром АРРА 503 (включен в Госреестр СИ под номером 49266-12 до 17.02.22 г.) с погрешностью измерений постоянного напряжения равной $\pm (0,03 \% + 20 \text{ ед. счета})$ в диапазоне 40 мВ – 1000 В, а постоянного тока: $\pm (0,2 \% + 40 \text{ ед. счета})$ в диапазоне 40 мА – 10А. Калибровочные графики датчика тока и напряжения представлены на рисунке 69:

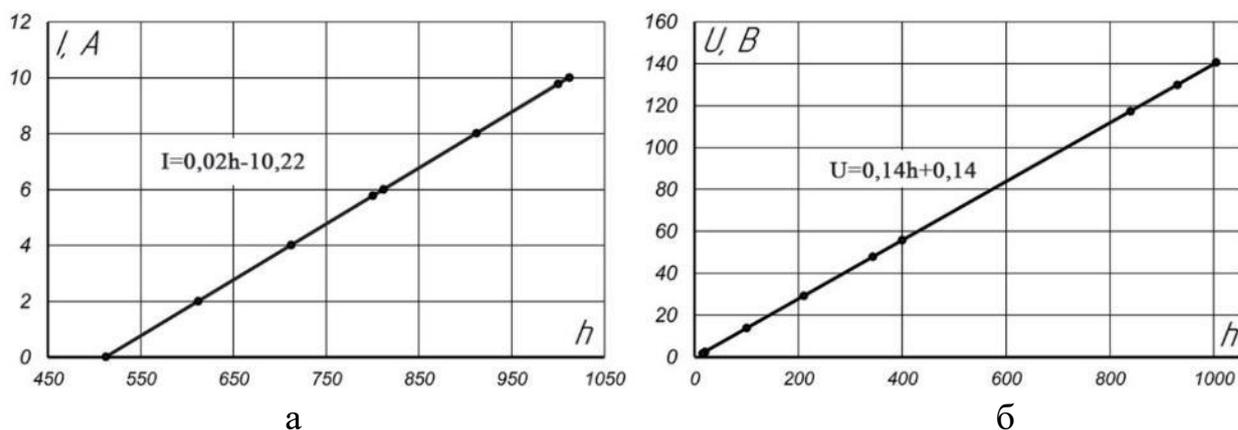


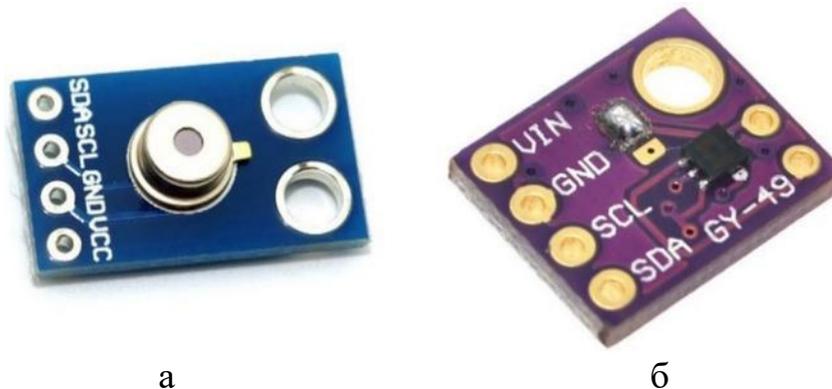
Рисунок 69 - Калибровочные данные датчиков
(а – тока; б – напряжения)

Для измерения температуры солнечных элементов и окружающей среды используется цифровой инфракрасный датчик температуры MLX90615, внешний вид которого изображен на рисунке 70а. Особенностью датчика является то, что в нем используется усилитель с низким уровнем шумов, 16-разрядный АЦП и высокопроизводительный сигнальный процессор. Благодаря этому достигается высокая точность измерения температуры (до $0,5^{\circ}\text{C}$) и разрешающая способность ($0,02^{\circ}\text{C}$). К достоинствам данного датчика можно также отнести то, что он поставляется откалиброванным на заводе изготовителем в температурном диапазоне: $-40^{\circ}\text{C} - +85^{\circ}\text{C}$ - для температуры окружающей среды, и $-40^{\circ}\text{C} - +115^{\circ}\text{C}$ - для температуры измеряемого объекта. Таблица значений температур хранится в ПЗУ датчика с разрешением $0,02^{\circ}\text{C}$. Считывание этих значений производится посредством двухпроводной шины, совместимой с SMbus. Для исключения влияния освещенности на показания датчика, корпус содержит оптический фильтр с полосой пропускания $5,5...14$ мкм [115].

В качестве датчика освещенности используется цифровой датчик освещенности MAX44009, внешний вид которого изображен на рисунке 70б. Датчик изготовлен по технологии BiCMOS, использующую интеграцию двух оптических датчиков: один для работы в инфракрасном спектре, а второй – в видимом. Это позволяет алгоритмам цифровой обработки сигналов учитывать

характеристики обоих датчиков и более точно определять уровень освещенности в широком 22-разрядном динамическом диапазоне от 0,045 до 188000 лк в диапазоне рабочих температур от -40 до +85°C. Кроме того, датчик содержит АЦП и другие функциональные элементы, позволяющие считывать измеренные, откалиброванные заводом изготовителем значения по интерфейсу I²C [27,113].

Одно измерение освещенности и температуры состоит из цикла измерений, состоящих из 500 автоматических измерений с нахождением среднего значения.



а б
Рисунок 70 – Внешний вид датчиков
(а – температуры; б – освещенности)

В качестве специальной регулируемой нагрузки использовался бустерный преобразователь (boost converter), широко используемый в устройствах поиска точки максимальной мощности и оптимизации выходной мощности [75,128]. К выходу преобразователя подключена нагрузка сопротивлением 0,1 Ом с пассивным охлаждением, способная выдерживать ток до 15 А в течении 50 сек и 8 А в течении 140 сек, что является достаточным вследствие того, что одно измерение (с получением 50 точек ВАХ и количеством измерений в каждой точке равным 500), не превышает 4,2 сек. Управление нагрузкой производится МК посредством ШИМ.

Внешний вид ИИК, работающий при различных режимах изображен на рисунке 71 и 72:

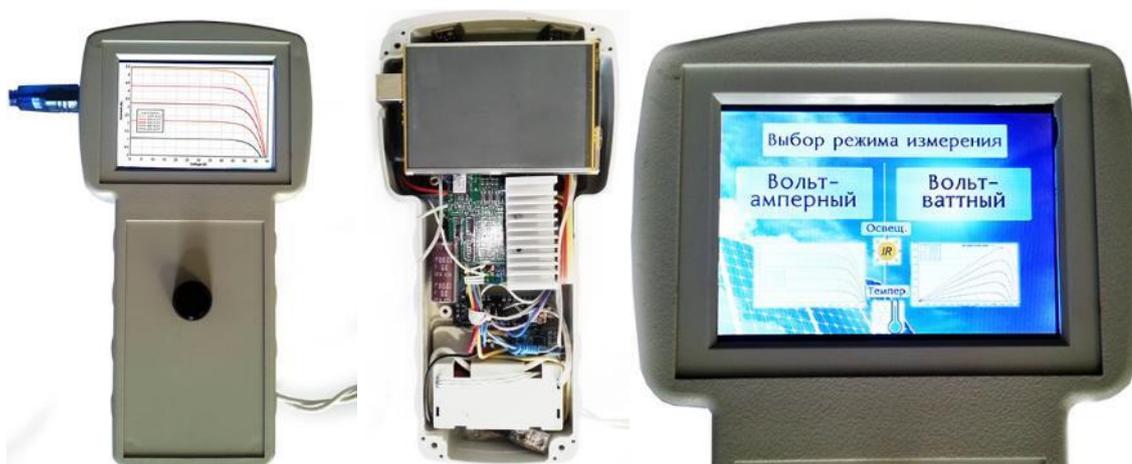


Рисунок 71 – Общий вид ИИК

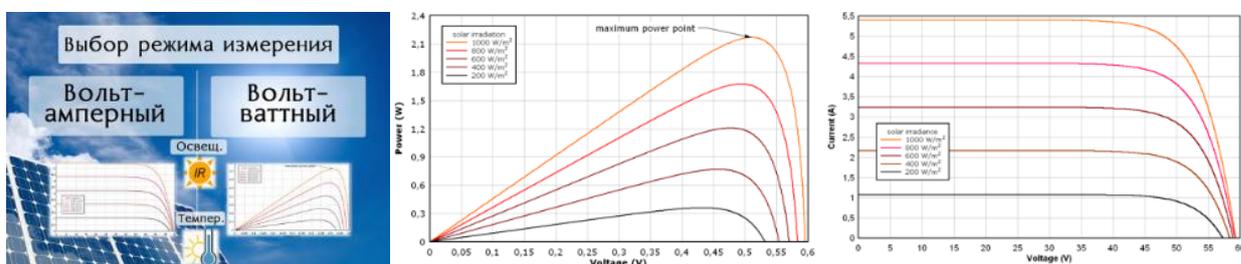


Рисунок 72 – Визуальный интерфейс ИИК

Измерения напряжений производились тремя цифровыми мультиметрами UNI-T UT39B, имеющие погрешность $\pm (0,5 \% + 1 \text{ ед. счета})$ в диапазоне от 200 мВ до 1000 В.

Значения токов измерялись двумя мультиметрами АРРА 503 (включен в Госреестр СИ под номером 49266-12 до 17.02.22 г.) с погрешностью измерений постоянного тока: $\pm (0,2 \% + 40 \text{ ед. счета})$ в диапазоне от 40 мА до 10А.

В экспериментах на солнечных электростанциях, нагрузкой являлась сеть, в которую поступала выработанная электрическая энергия через инверторы с функцией ОММ. Таким образом нагрузка на массивы фотоэлектрических модулей устанавливалась автоматически и соответствовала ТММ. Однако регулирование нагрузки только ОММ не является достаточным для построения отдельных характеристик, так как оно регулирует нагрузки всех параллельно-соединенных массивов. В связи с этим в качестве нагрузки отдельных модулей также были использованы реостаты РСРС-3-19 и РЗВ-

31Б, последовательно которым был включен амперметр (мультиметр APPA 503). Измерение напряжения производилось непосредственно на клеммах реостатов посредством мультиметра UNI-T UT39B.

Электрические параметры на входе и выходе инверторов контролировались через встроенное табло индикации. На Севастопольской солнечной электростанции установлены инверторы Fronius Agilo 100.0-3 Outdoor, а на электростанции в Алуште - Santerno Sunway TG 600V.

4.2 Методика проведения эксперимента

Эксперимент был проведен в 10 этапов, в ходе которых были получены электрические характеристики СФУ для условий, представленных в таблице 7:

Таблица 7 – Этапы эксперимента

№ п/п этапа	Вариант коммутации	Освещённость	Температура	Дополнительные элементы
1	-	равном., различная	различная	-
2	последовательная	равном., постоянная	различная	-
3	последовательная	част. затен., различная	постоянная	-
4	последовательная	част. затен., различная	постоянная	ИСП
5	параллельная	равном., различная	различная	-
6	смешанная	равном., различная	различная	-
7	смешанная	равном., различная	различная	УСФМ
8	смешанная	част. затен., постоянная	постоянная	-
9	смешанная	част. затен., постоянная	постоянная	УСФМ

При проведении 1-го этапа эксперимента объектом исследования был выбран солнечный элемент производства «КВАЗАР» серии К6М, изготовленный на основе монокристаллического кремния (с-Si) размерами 156x156 мм, класс – Н450, покрытого антиотражающим покрытием из нитрида

кремния. Такой же элемент использовался при проведении 5-го этапа эксперимента (с параллельной коммутацией).

Для проведения 2-го, 3-го и 4-го этапов, использовались два промышленных фотоэлектрических модуля KV-260M, и 6-ти модулей PS-250, состоящие из 60-ти последовательно соединенных поликристаллических солнечных элементов, размерами 156 x 156 мм. Номинальная мощность модулей KV-260M составляет 260 Вт, напряжение и ток в ТММ – 30,7 В и 8,47 А соответственно, а модули PS-250 – имеют номинальную мощность 250 Вт, напряжение и ток в ТММ – 30,8 В и 8,21 А соответственно.

Проведение экспериментов с различной освещенностью, производилось посредством изменения ориентации одной из панелей, при этом пересчитывалась интенсивность солнечного излучения, поступающей на такую панель. Частичное затенение панелей осуществлялось посредством создания искусственной тени непрозрачным экраном прямоугольной формы, расположенным на расстоянии 3-х метров от затеняемой панели. Перемещением экрана изменялась площадь затенения фотоэлектрических панелей.

При проведении этапов эксперимента со смешанной коммутации, использовались различные варианты расположения и ориентации фотоэлектрических модулей в массиве, являющиеся наиболее характерными для указанных условий. Так, при проведении 6-го и 7-го этапов использовался вариант расположения «Рядный вертикальный» (рисунок 73б), а при проведении 8-го и 9-го этапов – «Блочный вертикальный», «Блочный горизонтальный» и «Рядный горизонтальный» (рисунок 73 а,в,г).

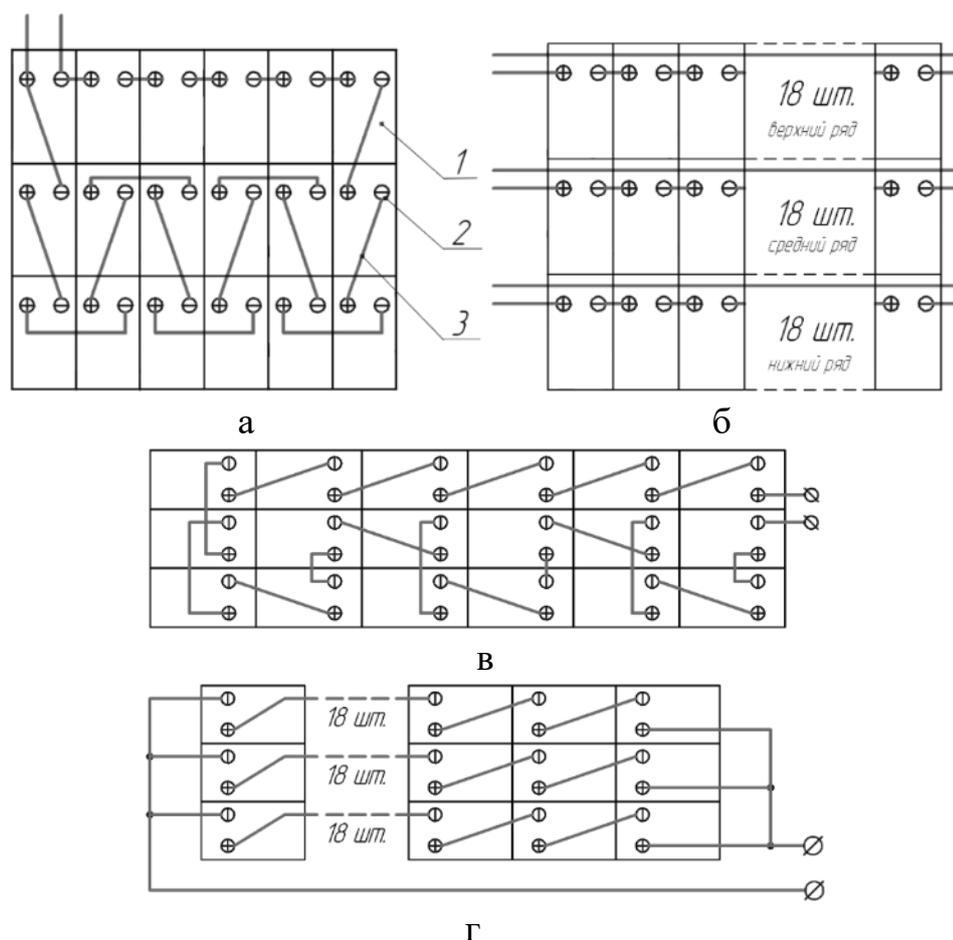


Рисунок 73 – Варианты расположения и ориентации фотоэлектрических модулей в массиве
 а – блочная вертикальная, б – рядная вертикальная, в – блочная горизонтальная, г – рядная горизонтальная
 (1 – фотоэлектрический модуль, 2 – клеммы, 3 – соединительные провода)

Для исследования работы СФУ с индивидуальными согласующими преобразователями в условиях неравномерной освещенности были использованы серийно выпускаемые индивидуальные согласующие преобразователи «Module Maximizer» фирмы Tigo Energy (США) [131] и собственного изготовления на основе DC/DC SEPIC преобразователя, выставленного в ТММ [48].

Для согласования фотоэлектрических модулей, в эксперименте со смешанной коммутацией (9 этап), было использовано УСФМ, описанное в 3-м разделе.

4.2.1 Определение интенсивности солнечного излучения

Определение интенсивности солнечного излучения производилось путем его вычисления через величину светового эквивалента по методу «Светового эквивалента», изложенному в [80], и измерении освещенности ИИК. Световой эквивалент равен отношению значения освещенности к интенсивности солнечного излучения. Таким образом можно вычислить суммарную и рассеянную интенсивность солнечного освещения по измеренному значению освещенности горизонтальной поверхности.

Значение светового эквивалента рассеянной радиации при ясном небе равно 114,72 кЛк на 1кВт/м². В таблице 8 приведены значения светового эквивалента суммарной солнечной радиации для ясного неба (в кЛк на кВт/м²).

Таблица 8 – Значения светового эквивалента для ясного неба от высоты Солнца

Высота Солнца, град.	10	20	30	40	50	60	70	75
Световой эквивалент, кЛк на кВт/м ²	88,9± 7,2	94,6 ± 7,2	97,5± 7,2	100,4± 7,2	101,8 ± 7,2	101,8 ± 7,2	103,3± 7,2	103,3± 7,2

Определение высоты солнца производилось при помощи приложения Sun Surveyor, установленного на смартфон. Расчеты в приложении производятся на основании местоположения, определяемого при помощи датчика GPS и текущего времени. Проверка показаний производилась при помощи навигационного секстанта №9166.

Освещенности горизонтальной поверхность измерялась при ясном небе при помощи ИИК. Расчет интенсивности на наклонную поверхность солнечных элементов осуществлялся согласно методике [53], по формуле:

$$S = S_c + D + R_{\text{фон}} + R_{\text{отр}}, \quad (87)$$

где S_c – прямая радиация;

D – ореольная радиация, или измеренная диффузная на горизонтальную поверхность;

$R_{\text{фон}}$ – фоновая радиация, падающая на наклонную поверхность;

$R_{\text{отр}}$ – радиация, отраженная от земли.

Контроль горизонтальной плоскости площадки, на которую устанавливался ИИК во время измерения освещенности, осуществлялся при помощи строительного уровня (ватерпаса). Во время измерений не допускалось затенение датчика, а также попадание на него дополнительного освещения.

4.2.2 Снятие характеристик, определение выходной мощности

Снятие вольт-амперной и вольт-ваттной характеристик, производилось в 1-5 этапах эксперимента для подтверждения результатов математического моделирования и проверки теоретических положений. Измерения проводились в автоматическом режиме при помощи разработанного ИИК с одновременным получением в численном и графическом виде данных о токе, напряжении, освещенности и температуре исследуемой фотоэлектрической установки. Определение выходной мощности массивов фотоэлектрических модулей в 6-9 этапах эксперимента, проведенных на промышленных солнечных электростанциях, осуществлялось посредством произведения напряжение и тока, измеренные ранее описанными измерительными приборами. Все измерения проводились согласно [17,20] при естественном солнечном свете. Коррекция температуры и облученности результатов измерения производилась согласно методики [16].

При проведении экспериментов с УСФМ на солнечной электростанции (9-й этап эксперимента), устройство было помещено в коммутационном щите, находящимся непосредственно перед инвертором. Это позволило одновременно отслеживать электрические параметры на инверторе (через табло индикации) и в исследуемом модуле.

4.2.3 Оценка погрешностей измерений экспериментальных данных

Для оценки истинного значения измеряемых величин по измеренным результатам была использована методика [74].

К началу математической обработки результатов измерений все грубые и систематические ошибки были устранены путем введения соответствующих поправок в результаты измерения и отбрасывания очевидно ошибочных результатов. Данные операции в 1-5 этапах производятся автоматически ИИК, в остальных, устраняются в первом этапе математической обработки измеренных результатов. Таким образом точность измерений в экспериментах определяется только случайными ошибками.

Истинное значение измеренной величины (a) находится в некотором доверительном интервале ($g-\varepsilon_1, g+\varepsilon_2$). Такой доверительный интервал покрывает истинное значение с заданной вероятностью P – надежностью оценки. Доверительные оценки характеризуются неравенством (88), с допущением того, что такие оценки симметричны и случайные ошибки измерения подчинены нормальному закону распределения вероятностей:

$$\bar{x} - \varepsilon < a < \bar{x} + \varepsilon,$$

или

$$|a - \bar{x}| < \varepsilon, \quad (88)$$

где \bar{x} – среднее арифметическое значение результатов измерений;

ε – величина, определяемая надежностью оценки, задаваемой в виде одного из трех уравнений 0,95, 0,99 или 0,999.

Для нахождения величины ε необходимо заранее знать среднюю квадратичную ошибку σ , но в связи с тем, что она нам не известна, вместо нее можно использовать эмпирический стандарт, вычисляемый как:

$$s = s^* \sqrt{\frac{n}{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (89)$$

где n – количество независимых измерений;

x_i – результат i -го измерения.

С учетом этого, доверительная оценка (88) примет вид:

$$|a - \bar{x}| < t(P; k) \frac{s}{\sqrt{n}},$$

или

$$|a - \bar{x}| < t(P; k) \frac{s^*}{\sqrt{k}}, \quad (90)$$

где $t(P; k)$ – множитель, зависящий от надежности оценки P и числа степеней свободы k ;

k – число степеней свободы, определяемое количеством измерений:

$$k = n - 1. \quad (91)$$

Значения множителя $t(P; k)$ были выбраны из таблицы [74], с рассчитанными значениями данного множителя для пяти уровней надежности P и для рассчитанных значений числа $k \geq 4$ при помощи распределения Стьюдента.

В связи с тем, что выбор надежности оценки допускает некоторую вольность, при обработке результатов эксперимента было использовано правило трех сигм. Таким образом, доверительная оценка, с учетом того что значение сигмы не известно, представляет собой выражение:

$$|a - \bar{x}| < \frac{3s}{\sqrt{n}}. \quad (92)$$

Данная оценка существенно зависит от количества измерений, в связи с чем, проводилось не менее пяти измерений для получения достаточно точных значений. Соответственно, при таком количестве измерений, значение $P > 0,96$, согласно [74].

Расчет отклонений истинных величин от среднеарифметических значений результатов измерений показывает, что погрешности измерений не выходят из предела $\pm 3,8 \%$.

Оценка измерений ИИК также была проведена посредством расчета абсолютных и относительных погрешностей. При их вычислении, учитывалась разрядность АЦП микроконтроллера, АЦП датчиков,

паспортные значения погрешности датчиков. Значения погрешностей приведены в таблице 9:

Таблица 9 – Абсолютная и относительная погрешность измерений ИИК

Измеряемая величина, размерность	Абсолютная погрешность (максимальная)	Относительная погрешность, %
Напряжение, В	0,14	$\pm 0,102$
Ток, А	0,04	$\pm 0,3$
Интенсивность излучения, Вт/м ²	65	$\pm 3,4$
Температура, °С	1	± 2

Из таблицы видно, что относительная погрешность измерений, проводимых посредством ИИК, не превышает 3,4 %, что свидетельствует о достаточно точных результатах измерения.

4.3 Результаты экспериментального исследования

1-й этап эксперимента проводился с целью верификации выбранной математической модели работы солнечного элемента. Измерения выходных параметров проводились в солнечный день, при различных значениях интенсивности освещения и температуре окружающей среды. На рисунке 74 представлены его результаты:

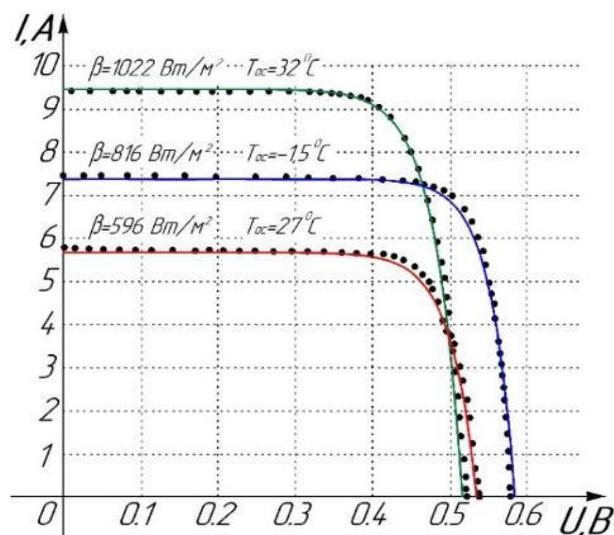


Рисунок 74 – Вольт-амперные характеристики солнечного элемента производства «КВАЗАР» серии К6М, полученные в результате математического моделирования и экспериментального исследования

Сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными при математическом моделировании, показывает, что отклонение выходных параметров солнечного элемента не превышает 1,8 %, что говорит о достаточно высокой точности используемой модели.

На 2-м этапе были получены экспериментальные характеристики СФУ, состоящие из последовательно-соединенных солнечных элементов, при их равномерном освещении. Измерения проводились в солнечный день при постоянной освещенности 810 Вт/м^2 и температуре окружающей среды 14°C . Значение скорости ветра, во время проведения эксперимента, составляло менее 1 м/с . На рисунке 75 (д, е) представлены его результаты:



а



б



в



г

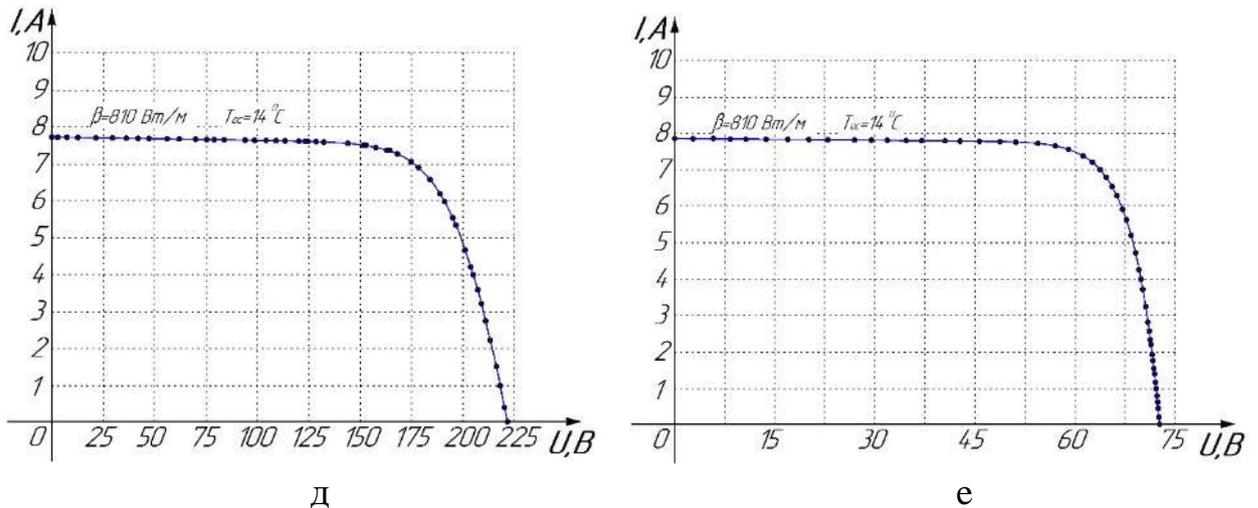


Рисунок 75 – Экспериментальное исследование СФУ, состоящих из последовательно-соединенных солнечных элементов, при их равномерном освещении

(а, б – с модулями KV-260M; в, г – с модулями PS-250; д – ВАХ СФУ с модулями KV-260M; е – ВАХ СФУ с модулями PS-250)

3-й этап эксперимента состоял из двух частей - сначала снималась вольт-амперная характеристика СФУ, в нижней части которой располагались плоские солнечные концентраторы (ПСК), затем снималась вольт-амперная характеристика СФУ с тремя частично затененными (в нижней части) фотоэлектрическими модулями (процент затенения составлял 10 %, интенсивность солнечного излучения в тени $\sim 100 \text{ Вт/м}^2$). ПСК между снятием характеристик перемещался таким образом, относительно модулей, чтобы отраженное от него излучение поступало равномерно на все модули, затем на все, кроме одного, а после – на все, кроме двух. На рисунке 76 изображена экспериментальная установка, состоящая из фотоэлектрических модулей PS-250:

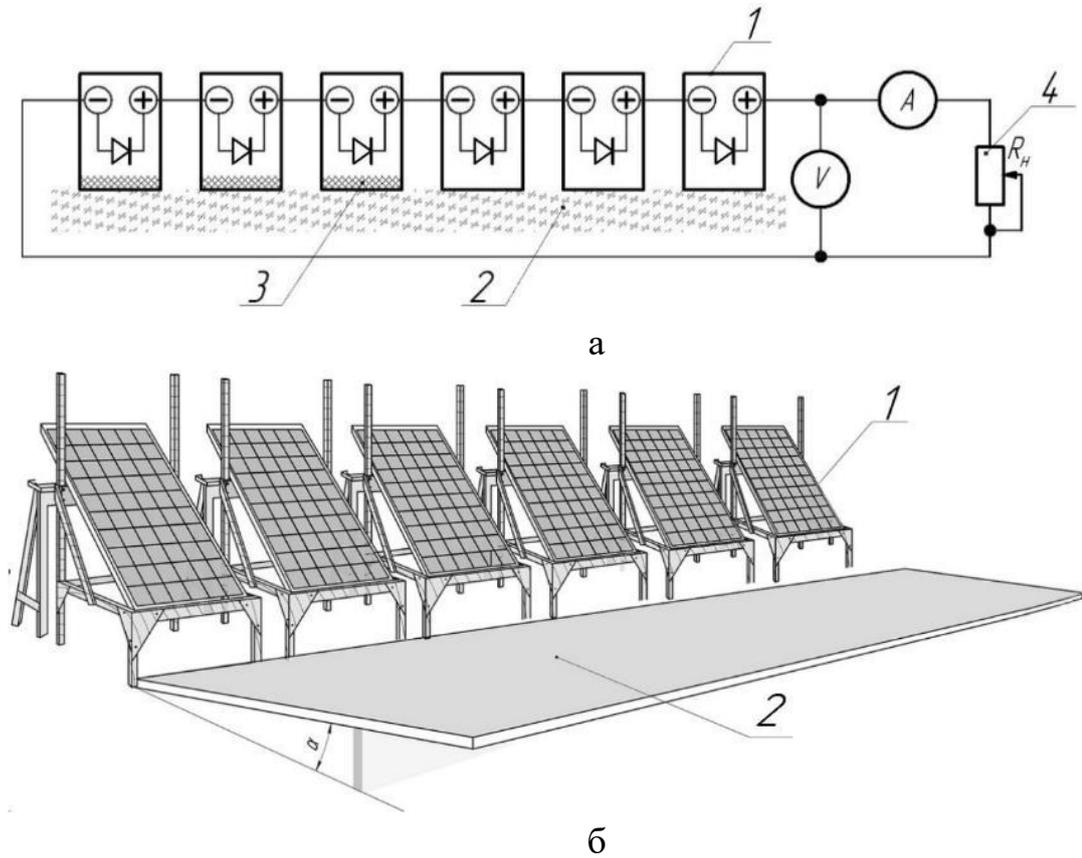


Рисунок 76 – Экспериментальная СФУ

(1 – фотоэлектрический модуль PS-250; 2 – плоский солнечный концентратор; 3 – затенение; 4 – нагрузка)

Результаты первой части проведенного этапа эксперимента (с ПСК), представлены на рисунке 77, а второго (с частичным затенением модулей) – на рисунке 78.

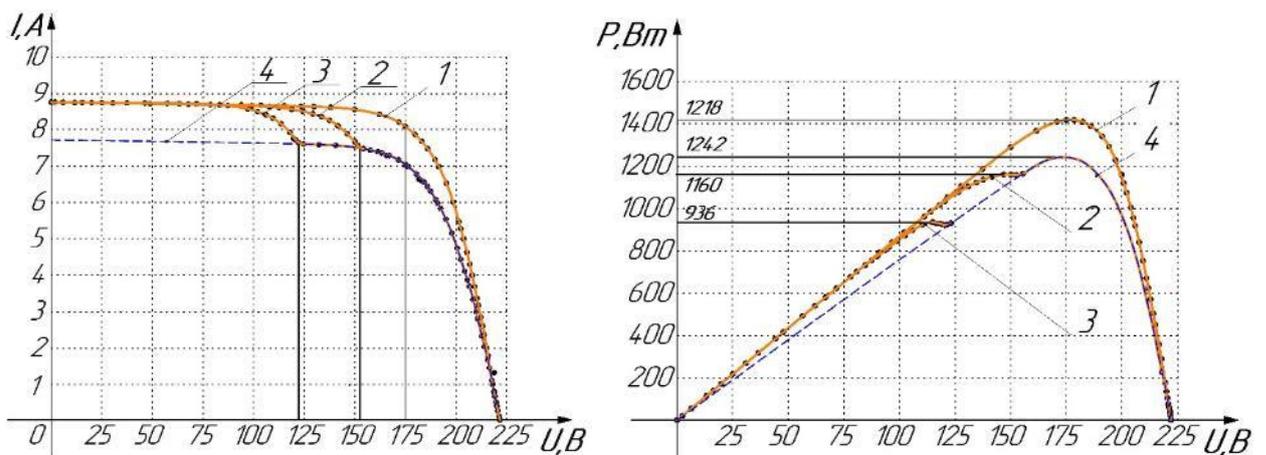


Рисунок 77 – Экспериментальные характеристики СФУ с ПСК

(1 – все модули равномерно освещены ПСК; 2 – на один модуль не поступает излучение от ПСК; 3 – на два модуля не поступает излучение от ПСК; 4 – без ПСК)

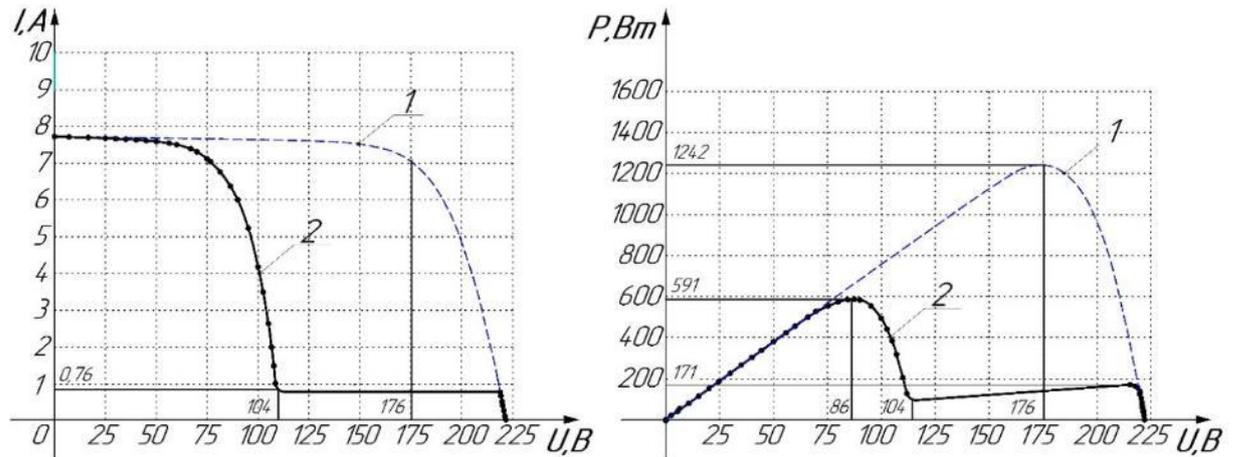


Рисунок 78 – Экспериментальные характеристики СФУ с частичным затенением

(1 – без затенения; 2 – с частичным затенением трёх модулей)

Полученные характеристики подтверждают результаты теоретических исследований. Из них видно, что эффект от ПСК достигается только в том случае, когда отраженное от него излучение поступает равномерно на все модули (кривая 1 на рисунке 77). В случаях, когда отраженное излучение не поступает хотя бы на один модуль – максимальная мощность СФУ не превышает мощности, получаемой без использования ПСК (кривые 2 и 3 на рисунке 77). Опыт с частичным затенением показал, что при уменьшении нагрузки до тока, равного току затененных модулей, происходит запирающее действие шунтирующих диодов и, как следствие, резкое увеличение напряжения на выходе СФУ, но при этом её мощность значительно ниже максимальной.

Из вышеизложенного видно, что использование только шунтирующих диодов в комбинации с блоком ОММ не позволяет отбирать всю электрическую энергию у СФУ с последовательной коммутацией при неравномерной освещенности - отключаются менее освещенные группы солнечных элементов, или отбор мощности производится с током, не превышающим тока менее освещенной группы.

Более полный отбор электрической энергии от такой СФУ в условиях неравномерного освещения позволяют индивидуальные согласующие преобразователи, устанавливаемые на каждой солнечной панели [104].

Принцип работы таких преобразователей основан на использовании DC/DC SEPIC преобразователей с гальванической развязкой и системой автоматического управления, позволяющей устанавливать режим отбора электрической энергии от фотоэлектрических модулей в ТММ, со значением тока равным току всей СФУ в точке максимальной мощности.

Для исследования работы СФУ с индивидуальными согласующими преобразователями (ИСП) в условиях неравномерной освещенности был проведен 4-й этап эксперимента. На рисунке 79 изображена схема экспериментальной установки, состоящей из шести вертикально расположенных фотоэлектрических модулей PS-250 соединенных последовательно. Параллельно менее освещенным панелям подключен DC/DC SEPIC преобразователь, выставленный в точку максимальной мощности. В качестве DC/DC SEPIC преобразователей в эксперименте были использованы преобразователи собственного изготовления, собранные на микросхемах UC3843, LM2596 и микроконтроллере ATmega328/P. При использовании LM2596 эксперимент проводился при ограниченной освещенности вследствие того, что выходной максимальный ток такого преобразователя не должен был превысить пяти ампер. Также, для получения сравнительных данных, в эксперименте были использованы серийно выпускаемые согласующие преобразователи «Module Maximizer» фирмы Tigo Energy, США (рисунок 79б), показавшие такой же результат, как и преобразователи собственного изготовления, в части характеристики близкой к точке максимальной мощности. В процессе снятия характеристик установки, после каждого изменения нагрузки, выдерживалась пауза продолжительностью 15-20 сек, необходимая для автоматической установки режима отбора электрической энергии согласующим преобразователем. Результаты экспериментального исследования представлены на рисунке 80:

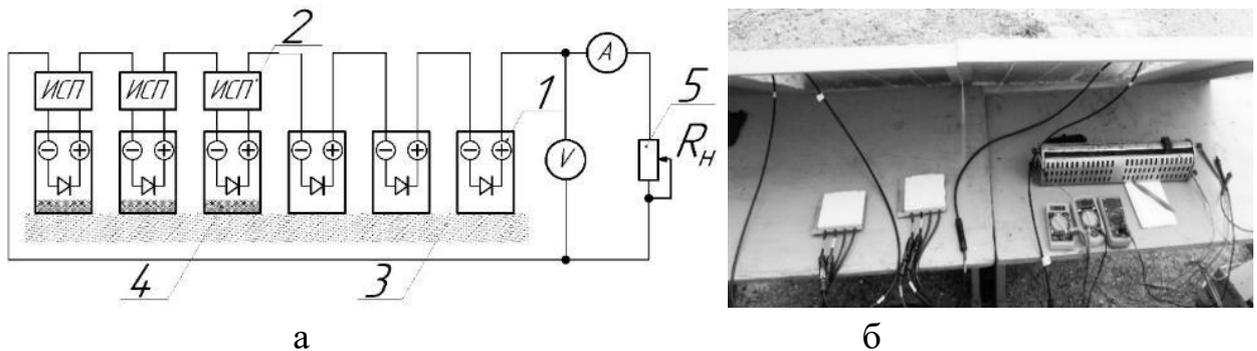


Рисунок 79 – Исследование работы СФУ с ИСП (а – схема экспериментальной установки; б – снимок, иллюстрирующий проведение эксперимента)

(1 – фотоэлектрическая панель PS-250; 2 - согласующий DC/DC SEPIC преобразователь; 3 – плоский солнечный концентратор; 4 – затенение; 5 – нагрузка)

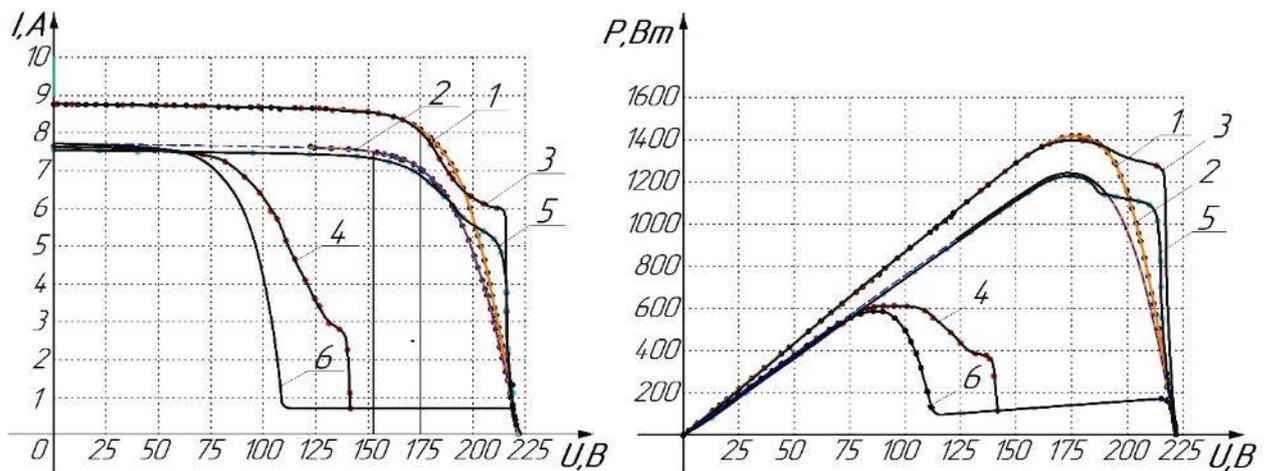


Рисунок 80 – Экспериментальные характеристики СФУ с ИСП (1 – равномерно освещенная СФУ с ПСК; 2 – равномерно освещенная СФУ без ПСК; 3 – неравномерно освещенная СФУ с ПСК и ИСП; 4 – частично затененная СФУ с ИСП; 5 – равномерно освещенная СФУ с ИСП; 6 – частично затененная СФУ без ИСП)

Из экспериментальных характеристик видно, что при неравномерном освещении индивидуальные согласующие преобразователи позволяют получить большее количество энергии от СФУ. Особенно ощутимый прирост наблюдается при их использовании в комплексе с ПСК. Однако, в случае равномерного освещения, энерговыработка установки снижается на величину коэффициента полезного действия преобразователей.

В 5-м этапе эксперимента были получены экспериментальные ВАХ СФУ, состоящей из 2-х параллельно-соединенных солнечных элементов «КВАЗАР» серии К6М, при различных значениях интенсивности излучения на одном и постоянном значении на другом элементе, а также ВАХ каждого элемента установки. Из полученных характеристик были определены значения энергетических потерь и значения разницы напряжений в ТММ, вызванные различной освещенностью (рисунок 25). Было установлено, что в таких условиях мощность установки снижается на величину до 7,5%, что соответствует результатам математического моделирования.

В 6-м и 7-м этапах эксперимента были получены экспериментальные характеристики (рисунок 81) и графики дневной энерговыработки (рисунок 84б) массива из 18-ти фотоэлектрических модулей KV-260М, имеющего равномерное затенение солнечных элементов (рисунок 27а), включенного параллельно 20-ти таким же массивам, не имеющих затенения, с установленным УСФМ (кривая 2) и без него (кривая 3). Эксперимент был проведен на Севастопольской солнечной электростанции, имеющей изначально блочную коммутация модулей. В связи с чем была проведена работа по перекоммутации модуля с блочной на рядную [46].

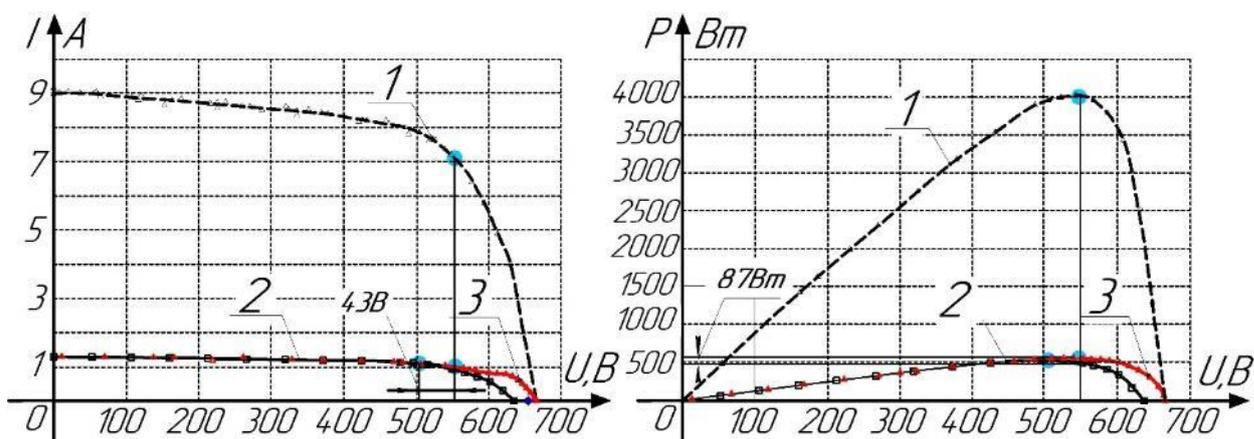


Рисунок 81 – Экспериментальные характеристики массива фотоэлектрических модулей

(1 – без затенения; 1 – с частичным затенением и рядной вертикальной коммутацией; 3 – с частичным затенением, рядной вертикальной коммутацией с УСФМ)

При проведении исследования УСФМ размещалось в соединительных щитах электростанции (рисунок 82). Представленные характеристики были получены при интенсивности солнечного излучения 750 Вт/м^2 на поверхностях модулей без тени и 100 Вт/м^2 на затененных модулях. Площадь затенения составляла 10 % площади модуля. Значение температуры солнечных элементов затененных модулей составляло $+13^\circ\text{C}$, а нормально освещенных – $+33^\circ\text{C}$. Из них видно, что при разнице напряжений в ТММ 43В, потери мощности без использования УСФМ составляют 87 Вт, что соответствует 17,9 % мощности.

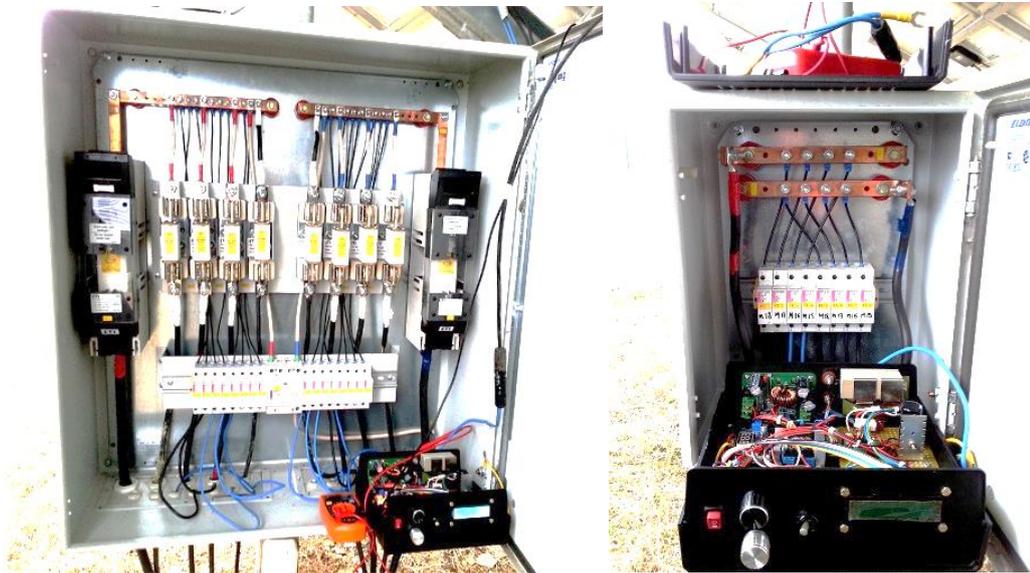


Рисунок 82 – Размещение УСФМ в соединительном щите «Севастопольской» солнечной электростанции

Структурная схема включения УСФМ в исследуемый массив изображена на рисунке 83:

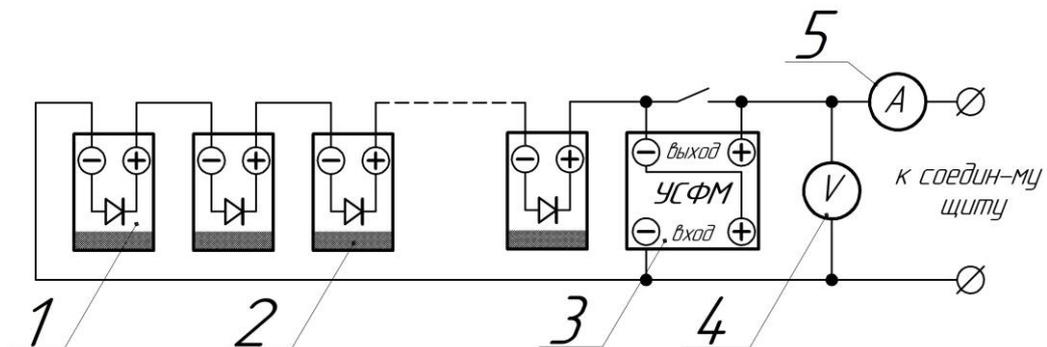


Рисунок 83 – Структурная схема включение УСФМ
(1 – солнечный модуль; 2 – тень; 3 – УСФМ; 4 – вольтметр; 5 - амперметр)

Исследования дневной энерговыработки показали, что использование УСФМ при таком характере затенения и коммутации позволяет увеличить выходную мощность массива до 22 %, а суточную энерговыработку на 8,7%. Для оценки влияния интенсивности излучения в тени на выходную мощность массива, в рамках данного этапа был также проведен соответствующий эксперимент, результаты которого изображены на рисунке 84а. Проведенные эксперимент подтверждает результаты, полученные при математическом моделировании с погрешностью, не превышающей 8,5 %.

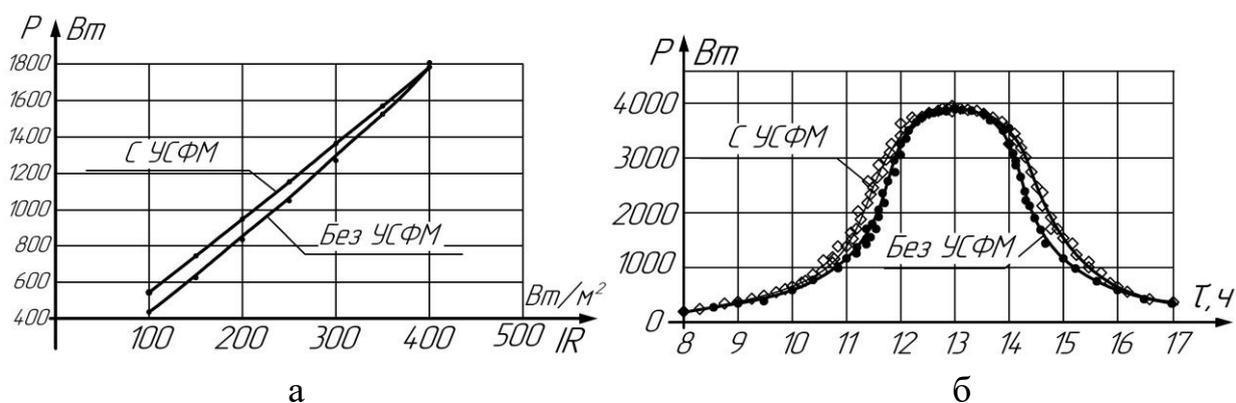


Рисунок 84 – Выходная мощность равномерно затененного массива модулей (а – от величины интенсивности излучения в тени; б – в течении светового дня)

8-й и 9-й этапы эксперимента были проведены аналогично 6-му и 7-му этапу с той разницей, что исследуемый массив фотоэлектрических модулей работал в условиях неравномерного затенения (рисунок 27б), создаваемого посредством непрозрачного экрана прямоугольной формы, расположенного на расстоянии 3-х метров от затеняемых модулей. Перемещением экрана изменялась площадь затенения фотоэлектрических модулей, соответствующая характеру затенения при горизонтальной и вертикальной блочной, а также горизонтальной рядной коммутации модулей. Для проведения эксперимента с горизонтальным расположением модулей на «Севастопольской» электростанции был выполнен монтаж модулей с соответствующей ориентацией на недостроенном участке станции.

Коммутация такого массива производилась в соединительной коробке с двенадцатью массивами, работающими без затенения. Так как при проведении эксперимента с блочной вертикальной и рядной горизонтальной коммутацией напряжение рассогласования составило более 90В, в модуль устанавливались два УСФМ с последовательно соединенными выходами.

На рисунке 85, представлены полученные ВАХ и ВВХ из которых видно, что использование УСФМ позволяет осуществить отбор электрической энергии от массивов модулей в ТММ в широком диапазоне напряжений. Благодаря этому при их равномерном частичном затенении (площадь 10-30%), выходная мощность увеличивается на 78% (2092 Вт) при блочной вертикальной или рядной горизонтальной коммутации и на 22,2% (787 Вт) при блочной горизонтальной коммутации.

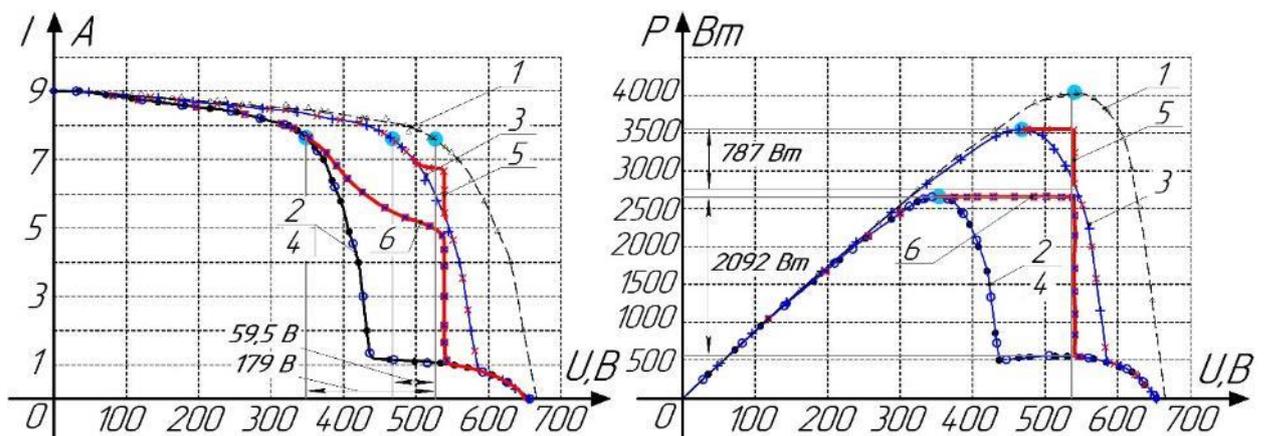


Рисунок 85 – Экспериментальные характеристики массива фотоэлектрических модулей

(1 – без затенения; 2 – с частичным затенением и блочной вертикальной коммутацией; 3 – с частичным затенением и блочной горизонтальной коммутацией; 4 – с частичным затенением и рядной горизонтальной коммутацией; 5 – с частичным затенением, горизонтальной блочной коммутацией и УСФМ; 6 – с частичным затенением, горизонтальной рядной, или блочной вертикальной коммутации с УСФМ)

Также в данных этапах было проведено исследование зависимости энергетических потерь массива модулей в зависимости от количества шунтированных затененных модулей. Данный эксперимент был проведен на промышленной сетевой солнечной электростанции «Севастопольской» ООО

«С. Энерджи-Севастополь» и частной ООО «НПФ «Энергоспецпроект». На первой электростанции параллельно-соединенные массивы модулей состоят из 18-ти последовательно-соединенных модулей, а на второй - из 10-ти. В эксперименте последовательное увеличение площади тени производилось на одну группу в связи с тем, что каждый модуль разбит шунтирующими диодами на 3 последовательные группы, отключаемые по отдельности при затенении солнечных элементов соответствующей группы. Результаты этого исследования приведены на рисунке 86.

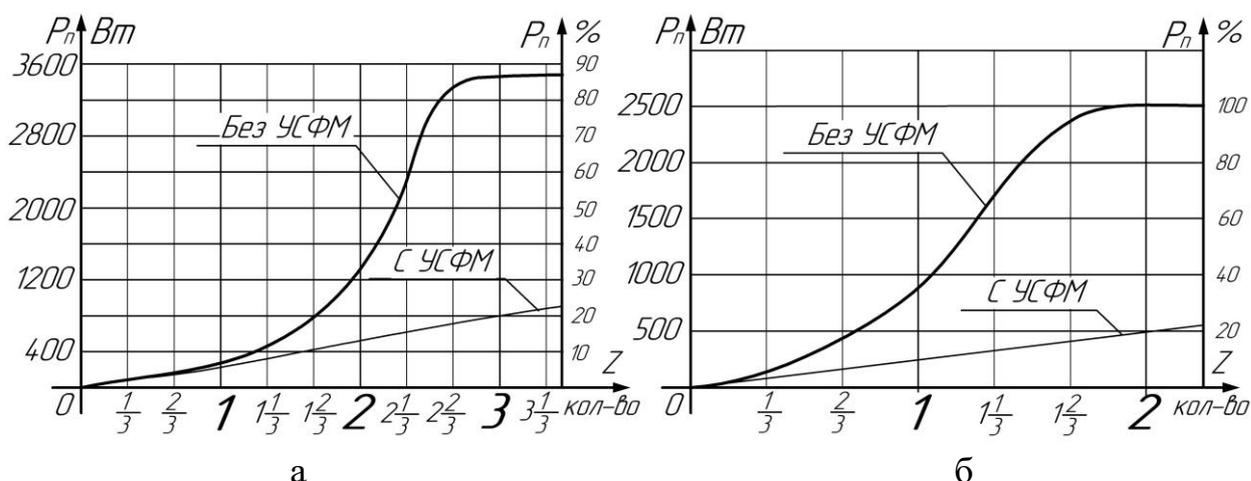


Рисунок 86 – Графики зависимости потерь мощности массива модулей от частичного затенения модулей

(а – на «Севастопольской» солнечной электростанции ООО «С. Энерджи-Севастополь»; б – на станции ООО «НПФ «Энергоспецпроект»)

Из полученных графиков следует, что в случае затенения 2-х панелей использование УСФМ позволяет 2,6 раз (с 34% до 13%) уменьшить потери мощности массива, состоящего из 18 модулей, а при большем затенении без УСФМ такой массив практически не способен вырабатывать электрическую энергию, значение которой определяет, в основном интенсивность излучения в тени. В случае затенения 1-го модулей в массиве, состоящем из 10 модулей, за счет использования УСФМ потери мощности снижаются в 3,4 раза (с 34% до 10%), а при затенении 2-х и более энерговыработка массива также, как и в предыдущем случае, практически не производится.

Для получения экспериментальных данных о суточной энерговыработке массива с частичным неравномерным затенением модулей и УСФМ, в рамках данных этапов было проведено исследование, во время которого в течении светового дня производилось поочередное искусственное затенение модулей одного массива «Севастопольской» солнечной электростанции. После каждого затенения производилось измерение его выходной мощности. Результаты исследования представлены на рисунке 87, из которых видно, что при затенении 2-х модулей из 18-ти использование УСФМ позволяет увеличить суточную энерговыработку массива на 43,7%, а в случае затенения 1-го – на 19,7 %.

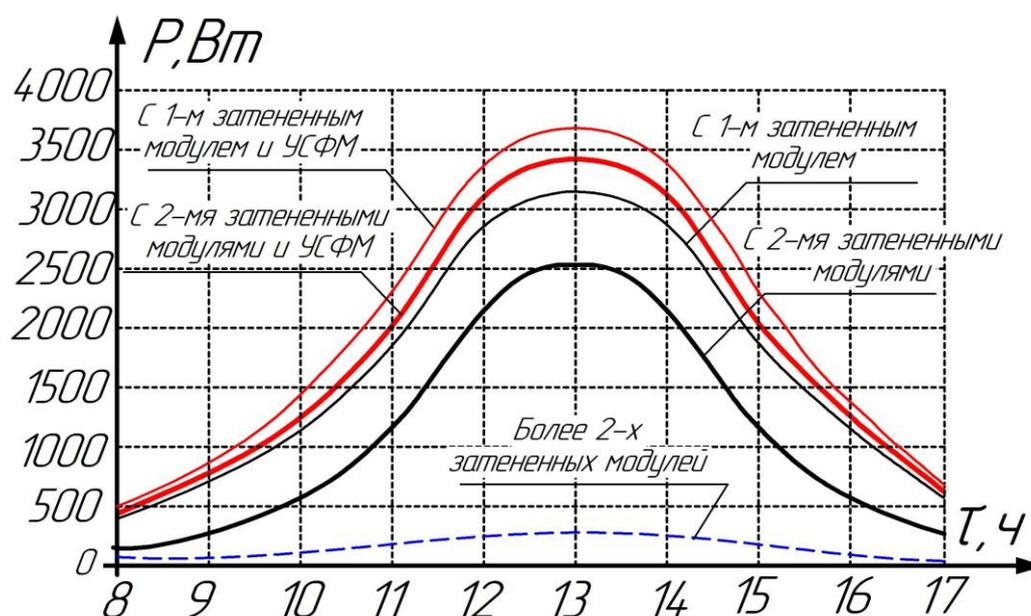


Рисунок 87 – Графики дневной энерговыработки массива модулей

4.4 Расчет экономической эффективности УСФМ

Результаты проведенных исследований демонстрируют возможность существенного увеличения энерговыработки солнечных установок, работающих в условиях частичного затенения, при использовании УСФМ. Однако конечное решение целесообразности их внедрения принимается исходя из результатов экономической оценки.

Эффективность работы УСФМ, как отмечалось ранее, в первую очередь зависит от факторов, влияющих на продолжительность и характер затенения

установки. Вследствие этого, расчет экономической эффективности от их использования и срок окупаемости, необходимо производить для каждого случая в отдельности, учитывая конструктивные особенности солнечной установки (расположение, ориентацию и коммутацию фотоэлектрических панелей) и условия окружающей среды. В связи с этим, оценка экономической эффективности использования УСФМ производилась для наиболее характерных 2-х вариантов конструкций солнечных установок, используемых на солнечных электростанциях - блочной вертикальной, 3-х рядная (рисунок 88а) и 4-х рядной горизонтальной, (рисунок 88б). Прототипами таких станций являются – «Севастопольская» солнечная электростанция (установленная мощность 2,99 МВт) и «Николаевка» (установленная мощность 69,7 МВт).



а

б

Рисунок 88 – Варианты конструкций солнечных установок
(а - блочная вертикальная, 3-х рядная; б - 4-х рядная горизонтальная)

Для расчетов, местом установки солнечных электростанций принята Республика Крым, г. Симферополь (45° северной широты). Угол наклона поверхностей панелей к горизонту составляет 27° , ориентация панелей на юг. Тип используемых фотоэлектрических панелей KV-260. Расстояние между рядами – 5 м. На «Севастопольской» станции УСФМ устанавливаются в каждый параллельный массив фотоэлектрических модулей, а на «Николаевке» только в массивы, нижних рядов. Количество модулей в массивах – 18.

Расчет экономической эффективности производят статическим методом, не учитывающим фактор времени окупаемости, и динамическим, учитывающий его. Статический метод целесообразен при небольших сроках

окупаемости и его результатом выступает расчет этого срока окупаемости за счет снижения текущих затрат. Динамический, применяется при больших сроках окупаемости и рассматривается весь период его использования, показателями экономической эффективности такого метода являются дисконтированный доход [93, 32].

Срок окупаемости затрат от внедрения УСФМ можно вычислить из формулы:

$$T = \frac{З}{\Pi}, \quad (93)$$

где Π – годовая экономическая прибыль, (млн руб.);

$З$ – затраты, (млн руб.).

Затраты на внедрение УСФМ, без учета стоимости их установки (так как она будет производится штатным обслуживающим техническим персоналом электростанции) рассчитываются по формуле:

$$З = Ц_{\text{УСФМ}} \cdot n, \quad (94)$$

где $Ц_{\text{УСФМ}}$ – цена УСФМ (руб.);

n - количество УСФМ, устанавливаемое на электростанции.

Годовую экономическую прибыль можно вычислить как разницу дохода, полученного за год электростанцией с внедрением УСФМ и без их использования:

$$\Pi = D_2 - D_1, \quad (95)$$

где D_1 – доход электростанции без УСФМ, (млн руб.);

D_2 - доход электростанции с УСФМ, (млн руб.).

Доходы, получаемые электростанцией можно вычислить как:

$$D_1 = W_1 \cdot t, \quad (96)$$

$$D_2 = W_2 \cdot t, \quad (97)$$

где W_1 – объем электроэнергии, отпущенной электростанцией в энергопринимающие устройства без УСФМ, (кВт/ч);

W_2 – объем электроэнергии, отпущенной электростанцией в энергопринимающие устройства с УСФМ, (кВт/ч);

t – размер тарифа на электроэнергию, ((руб./кВт/ч)).

Объемы электроэнергии, отпущенные электростанциями, для расчета экономической прибыли от внедрения УСФМ, целесообразно рассчитывать не только для периода, когда значение эффекта от их использования максимально (периоды с невысокими значениями высоты солнца), а для всего года. Это связано с тем, что эффект от его использования определяется не только существенным рассогласованием по напряжению от частичного затенения соседними рядами, но и от случайных и несущественных постоянных факторов – частичного и неравномерного загрязнения, неравномерной деградацией панелей, снижением рассеянной составляющей освещенности панелей нижнего ряда и так далее.

На основании многолетних метеорологических данных интенсивности солнечного излучения для Республики Крым [54], пересчитанных на произвольно-ориентированную поверхность по аналитическим зависимостям, приведенным в [89], данных о высоте солнца для любого момента времени, результатов экспериментальных исследований, изложенных в пункте 1.4 и математической модели работы СФУ со смешанной коммутацией в условиях неравномерного освещения, изложенной во 2-м разделе, а также данных о месячной и суточной выработке электроэнергии «Севастопольской» солнечной электростанции за 2014 г. (предоставленные ООО «С. Энерджи Севастополь») и Белгородской за 2013-2015 гг. (предоставленные ООО «Эко Энерджи») составлена сравнительная таблица 10, включающая данные о среднесуточном месячном объеме отпущенной электроэнергии без внедрения УСФМ и с ним для 2-х вариантов конструкций электростанций:

Таблица 10 – Среднесуточные месячные данные о объеме отпущенной электроэнергии солнечными электростанциями

СЭС	«Севастопольская»		«Николаевка»		Среднесуточная интенсивность солнечного излучения (табл.), кВт/м ²
	W ₁ , констр.1, МВт	W ₂ , констр.1, МВт	W ₁ , констр.2, МВт	W ₂ , констр.2, МВт	
Январь	15,85	69,15	1315,37	2316,46	41,39
Февраль	52,24	130,04	2796,41	4007,71	51,11
Март	214,65	234,02	6456,47	6841,94	100,56
Апрель	245,82	251,22	6396,75	6732,75	126,39
Май	241,62	248,39	6502,69	6656,85	154,44
Июнь	237,98	246,27	6441,81	6599,93	163,89
Июль	260,65	265,85	6927,24	7124,89	186,11
Август	211,46	226,56	5869,41	6071,81	182,78
Сентябрь	116,94	138,89	3428,04	3722,15	151,39
Октябрь	55,26	98,47	2224,35	2639,02	110,83
Ноябрь	28,7	76,35	1518,89	2046,07	65,56
Декабрь	11,7	60,95	1090,76	1633,38	39,17
Сумма	1692,92	2046,16	50968,19	56392,96	1373,62

Стоимость одного УСФМ можно рассчитать по формуле:

$$C_{\text{УСФМ}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{кп } i} + \sum_{j=1}^m C_{\text{сб } i}, \quad (98)$$

где $C_{\text{кп } i}$ – стоимость i -го комплектующего, (руб);

$C_{\text{сб } i}$ – стоимость сборки j -го сборочного узла, (руб);

n – количество комплектующих;

m – количество сборочных узлов.

Конструкция УСФМ основана на 3-х основных комплектующих: преобразователя, обеспечивающего гальваническую развязку, устройства

автоматического управления и датчиков электрических параметров. Для оценки их стоимости, целесообразно использовать данные о стоимости аналогичного оборудования, представленного на рынке. Исходя из этого, был проведен подбор комплектующих, основанный на технико-экономическом анализе оборудования, представленного на рынке в настоящее время. В таблице 11 приведены его результаты:

Таблица 11 – Результаты оценочных данных стоимости комплектующих для сборки одной единицы УСФМ

Наименование	Модель	Стоимость	Характеристики	Изображение
Импульсный источник питания с гальванической развязкой	GYUSPW S1500-90 (1-й вариант)	6400 руб.	$P_{\text{ВЫХ}} - 1500 \text{ Вт}$ $U_{\text{ВЫХ}} - 90 \text{ ВТ}$ $I_{\text{ВЫХ}} - 16,7 \text{ А}$	
Устройство управления	STM32F103C8T6	140 руб.	$F = 72 \text{ МГц}$ $k\text{SPS} = 2000$ $n_{\text{АЦП}} = 12 \text{ бит}$	
Датчик тока	ACS712 20A	80 руб.	$I_{\text{ИЗМ}} = 20\text{А}$	

Кроме стоимости основных комплектующих, цену УСФМ определяют также дополнительные элементы (стабилизатор напряжения для питания устройства управления, соединительные провода, стойки РСНСН-6 и т.д.), составляющие 3-5 % от общей стоимости основных комплектующих.

Сборка УСФМ состоит из одного сборочного узла, это связано с тем, что она производится из комплектующих в полностью собранном виде. Норма времени на её осуществление, электромонтером по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики составляет 1,29 с разрядом работы 4 согласно [51]. Таким образом её стоимость с учетом [82] можно вычислить:

$$C_{сб} = \frac{Z_m \cdot H_b}{N_d \cdot N_q} = \frac{24700 \cdot 1,29}{20 \cdot 8} \approx 200 \text{ руб.} \quad (99)$$

где Z_m – месячная зарплата, (руб.);

H_b – норма времени на сборку одного устройства, (ч);

N_d – количество рабочих дней в неделю;

N_q – норма рабочего времени.

Исходя из этого, стоимость одного УСФМ по формуле (5) составляет:

$$C_{УСФМ} = 6400 + 140 + 80 + (6400 + 140 + 80) \cdot 0,04 + 200 = 7084,8 \text{ руб.}$$

Для расчета затрат на внедрение УСФМ на солнечных электростанциях необходимо также знать их количество, определяемое соотношением:

$$n = \frac{P_{ЭС}}{1000 \cdot P_{п} \cdot n_{пм} \cdot n_{зм}}, \quad (100)$$

где $P_{ЭС}$ – установленная мощность электростанции, (МВт);

$P_{п}$ – номинальная мощность одной панели, (Вт);

$n_{пм}$ – количество панелей в модуле;

$n_{зм}$ – количество модулей, подверженных затенению.

Так как на солнечных электростанциях фотоэлектрические модули образованы из восемнадцати последовательно соединенных панелей PS-250, номинальной мощностью 250 Вт, и на «Севастопольской» все они подвержены частичному затенению, а на «Николаевке» наиболее существенно находящиеся в нижнем ряду, (за исключением модулей первого ряда от южного направления) необходимое количество УСФМ, согласно уравнению (7), для «Севастопольской» станции составляет 515 шт., а для «Николаевки» 3827 шт.

В таблице 12 представлены результаты расчета экономических показателей внедрения УСФМ на солнечных электростанциях:

Таблица 12 – Экономические показатели внедрения УСФМ

Электростанция	n, шт.	D ₁ , млн руб.	D ₂ , млн руб.	W ₁ , МВт·ч	W ₂ , МВт·ч	П, млн руб.	З, млн руб.	T, г.
«Севастопольская»	515	5,874	7,1	1692,92	2046,16	1,226	3,649	≈3
«Николаевка»	3827	176,86	195,684	50968,19	56392,96	18,824	27,114	1,44

Из представленных в таблице данных видно, что срок окупаемости внедрения УСФМ на «Севастопольской» солнечной электростанции составляет около 3-х, а на «Николаевке» около полутора лет.

Выводы по разделу:

Разработана методика проведения экспериментальных исследований работы солнечных фотоэлектрических установок при различных условиях освещенности.

Для проведения измерений и регистрации параметров исследуемых установок, собраны средства измерения и контроля. Разработан и изготовлен информационно-измерительный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме производить изменение нагрузки с измерением, регистрацией и отображением в графическом и численном виде значений напряжения, тока, освещенности, температуры окружающей среды и солнечных элементов. Проведена оценка погрешности измерений и экспериментальных данных, свидетельствующая о достаточно точных результатах измерений – относительная погрешность не превысила 3,4 %.

Представлены результаты экспериментальных исследований, показывающие соответствие результатов математического моделирования. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 8,5 %. Проведенные эксперименты с УСФМ на действующих солнечных электростанциях подтверждают положительный эффект от его использования

при работе в условиях неравномерной освещенности. В случае затенения 1-го модуля из 18-ти дневная энерговыработка увеличивается на 19,7 %, при затенении 2-х – на 43,7%, а при большем затенении без УСФМ такой массив практически не способен вырабатывать электрическую энергию.

Рассчитана экономическая эффективность от внедрения УСФМ на солнечные электростанции с различными вариантами конструкций - блочной вертикальной 3-х рядной (на примере «Севастопольской» электростанции) и 4-х рядной горизонтальной (на примере электростанции «Николаевка»). Срок окупаемости первого варианта составил около трех, а второго – около полутора лет, со среднегодовой прибылью 1,226 и 18,824 млн руб. соответственно.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Результаты проведенного теоретического анализа работы СФУ с различными вариантами коммутации солнечных элементов и применением устройств, реализующих способы повышения эффективности в условиях неравномерного освещения, позволяют производить оценку их энергоэффективности при работе в различных условиях окружающей среды, а также обоснованно применять устройства, реализующие различные способы повышения эффективности. Составленные на основе анализа математические модели с использованием СКА Mathcad Prime 3, позволяют определять значения энергетических характеристик СФУ, на основе показателей, учитывающих комплексное воздействие интенсивности солнечного излучения, температуры, коммутации, конструкции и различных способах отбора электрической энергии.

2. Изобретенный эффективный способ отбора электрической энергии от параллельно соединенных массивов фотоэлектрических модулей, работающих в условиях различной освещенности, позволяет значительно увеличить их энерговыработку за счет согласования их по напряжению в ТММ. Важной особенностью данного способа является то, что для согласования массивов не требуется преобразование всей вырабатываемой ими электрической энергии, а лишь её небольшой части, определяемой уровнем рассогласованности.

Разработанный лабораторный макет УСФМ, реализующий изобретенный способ, позволяет в автоматическом и ручном режиме выполнять согласование модулей в диапазоне расхождения напряжения 2-90 В с выходным током до 9 А, что соответствует 9-ти шунтированным группам солнечных элементов, или 3-м промышленным фотоэлектрическим модулям типа KV-260, PS-250, KV-245 и др., используемыми на большинстве фотоэлектрических станций.

3. На основе разработанной методики исследования работы СФУ в условиях неравномерного освещения, была создана экспериментальная установка, осуществлен подбор необходимого оборудования, приспособлений

и контрольно-измерительной аппаратуры. Разработан и изготовлен ИИК, позволяющий в автоматическом режиме производить изменение нагрузки с измерением, регистрацией и отображением в графическом и численном виде значений напряжения, тока, освещенности, температуры окружающей среды и поверхности солнечных элементов. Проведена оценка погрешности измерений и экспериментальных данных, свидетельствующая о достаточно точных результатах измерений – относительная погрешность не превысила 3,4%.

4. Результаты проведенного экспериментального исследования работы СФУ с различными вариантами коммутации солнечных элементов и конструкций расположения фотоэлектрических модулей, а также с использованием устройств, реализующих способы повышения эффективности в условиях неравномерной освещенности, показывают соответствие результатов математического моделирования. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 8,5 %.

Проведенные эксперименты с УСФМ на действующих солнечных электростанциях подтверждают положительный эффект от его использования при работе в условиях неравномерной освещенности – при затенении 1-го модуля из 18-ти дневная энерговыработка увеличивается на 19,7 %, при затенении 2-х – на 43,7%, а в случае большего затенения массив практически не способен вырабатывать электрическую энергию без разработанного устройства.

5. Оценка экономической эффективности внедрения УСФМ на солнечные электростанции с различными вариантами конструкций - блочной вертикальной 3-х рядной (на примере «Севастопольской» электростанции) и 4-х рядной горизонтальной (на примере электростанции «Николаевка») показывает, что срок окупаемости первого варианта составляет около трех, а второго – около полутора лет, со среднегодовой прибылью 1,226 и 18,824 млн руб. соответственно.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- СЭ – солнечный элемент
- СФУ – солнечная фотоэлектрическая установка
- ВИЭ – возобновляемые источники энергии
- СЭС – солнечная электростанция
- КПД – коэффициент полезного действия
- ИСП – индивидуальный согласующий преобразователь
- ОС – окружающая среда
- ОММ – устройство поиска точки максимальной мощности и оптимизации выходной мощности
- СКА – система компьютерной алгебры
- ТЛМ – точка локального максимума
- ТАМ – точка абсолютного максимума
- ТММ – точка максимальной мощности
- ТХХ – точка холостого хода
- УСФМ – устройство согласования массивов фотоэлектрических модулей
- ЭВУ – электронно-вычислительное устройство
- КЗ – короткое замыкание
- ПО – программное обеспечение
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция
- ИИК – информационно – измерительный комплекс
- МК – микроконтроллер
- ПК – персональный компьютер
- ВАХ – вольт-амперная характеристика
- ВВХ – вольт-ваттная характеристика
- ПСК – плоский солнечный концентратор
- ЭДС – электродвижущая сила

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономная система электроснабжения: пат. 2035109 Рос. Федерация: МПК H02J 7/35/ А.И. Чернышев, Ю.А. Шиняков, К.Г. Гордеев и др.; заявитель и патентообладатель НПО "Полюс". – № [5007798/07](#); заявл. 04.11.1991; опубл. 10.05.1995
2. Акулинин А., Смыков В. Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации. – Проблемы региональной энергетики, 2008, № 1, С. 23-30.
3. 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.
4. Амелин С. А., Пульнова К. Г. Модель датчика тока на основе эффекта холла // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. 2013. № 4 т. 12.
5. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: учебное пособие. М.: "Высшая школа", 1994. 544 с.: ил. с.
6. Андреев В.М. Оптимизация параметров солнечных модулей на основе линзовых концентраторов излучения и каскадных фотоэлектрических преобразователей / В.А. Андреев, Н.Ю. Давидюк, Е.А. Ионова, П.В. Покровский В.Д. Румянцев, Н.А. Садчиков // Журнал технической физики – 2010 г. – Т. 80. – Вып. 2. – С.118-125.
7. Артемова Е. Энергия солнца [Электронный ресурс]: сетевое издание «Интерфакс-Россия». – Режим доступа: <http://www.interfax-russia.ru/South/view.asp?id=545580>

8. Афанасьев, В.П. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.
9. Афлятонов Р.Ф., Насипов Р.В. Развитие солнечной энергетики в Крыму в постсоветский период // Исследование различных направлений современной науки. - Астрахань: Научный центр "Олимп", 2016. - С. 88-94.
10. Ахметшин, А.Т. Солнечные установки с неподвижным концентратором и мобильной передвижной системой с фотоэлектрическим преобразователем / Ахметшин А.Т., Галимарданов И.И. // Материалы XLIX Международной научно-технической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2010. – Ч.2. – С. 278- 282.
11. Бестужев-Лада И.В. Альтернативная цивилизация. – М.: Владос, 1998.
12. В Крыму потребление электричества за год снизилось почти на 10 процентов // Новости Крыма, крымская служба новостей [Электронный ресурс]. URL: <http://news.allcrimea.net/news/2015/2/26/v-krymu-potreblenie-elektrichestva-za-god-snizilos-pochti-na-10-protstentov-32093/>
13. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
14. Глиберман, А. Я. Кремниевые солнечные батареи / А. Я. Глиберман, А. К. Зайцева. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961г. – 72 с.
15. Голомазов Е.Г. Концепция разработки электронного модуля автономного питания на основе солнечных батарей // Известия КГТУ им. И. Раззакова. - 2012. - №26. - С. 6-8.
16. ГОСТ 28976 – 91. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции по температуре и облученности результатов измерения вольт-амперной характеристики. – Введ. 1992 - 01 - 01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 7 с.

17. ГОСТ 28977 – 91 (МЭК 904 - 1 - 87). Фотоэлектрические приборы. Часть 1. Измерения фотоэлектрических вольт - амперных характеристик. – Введ. 1992 - 01 - 01. – М.: ИПК Изд - во стандарты, 2004. – 7с.
18. ГОСТ 7.32-2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. 18.10.2016. Всероссийский институт научной и технической информации, Межгосударственный технический комитет по стандартизации МТК 191.
19. ГОСТ 8.417-2002. Единицы величин. Государственная система обеспечения единства измерений. 2003-09-01 ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева"
20. ГОСТ Р 51594 – 2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения. – Введ. 2000 - 04 - 21. 2000 - 01 - 01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 16с.
21. ГОСТ Р 51597 – 2000. Нетрадиционная энергетика. Модули солнечные фотоэлектрические. Типы и основные параметры. – Введ. 2000-04-21. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 8с.
22. ГОСТ Р 8.596-2002. Метрологическое обеспечение измерительных систем. 2003-03-01. ФГУП "ВНИИМС"
23. ГОСТ Р 8.820-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения. 18.10.2016 ФГУП "ВНИИМС"
24. Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [Электронный ресурс]: портал Министерства энергетики Российской Федерации.– Режим доступа: <http://gisee.ru/news/top/53246/>

25. Гременок В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2007– 222 с.
26. Грилихес В.А. Солнечные космические электростанции - Л.: Наука, 1986. - 182 с.
27. Губа А. Цифровые датчики освещенности МАХ44007 и МАХ44009 компании Maxim // Электронные компоненты. - 2011. - №6. - С. 11-13.
28. да Роза А., Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы / А. да Роза. - М.: МЭИ, Интеллект, 2010. - 704 с.
29. Дорофеев В.В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России / В.В. Дорофеев, А.А. Макаров //Бесплатная электронная версия журнала «Энергоэксперт» № 4, 2009 – С. 28-34.
30. Дятлова Е.П., Сафонова М.Р. Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами ЦБП: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГТУРП, 1999. – 51 с.
31. Заявка на патент РФ № 2016138181, 26.09.2016. Кузнецов П.Н., Борисов А.А. Способ отбора электрической энергии от батарей фотоэлектрических преобразователе.
32. Земцов А.В. Оценка эффективности инвестиционного проекта // Методический журнал Банковское кредитование. - 2008. - №6. - С. 92-101.
33. История развития солнечной энергетики в именах и числах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sunexperts.ru/istoriya-razvitiya-solnechnoj-energetiki/>
34. Китаева М.В. Системы слежения за солнцем для солнечной энергетики. Сборник XV Международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ». С.54-55
35. Клюев А.С., ГлазовБ.В., ДубровскийА.Х. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. –М.:Энергия, 1980. –512 с.

36. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985, 280 С.
37. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. - М.: БГУ им. В. И. Ленина, 1982. - 302 с.
38. Крым включает солнце и ветер // АО «Коммерсантъ» [Электронный ресурс] URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2540637>
39. Крым располагает высоким потенциалом развития альтернативных источников энергии // Министерство топлива и энергетики Республики Крым. [Электронный ресурс] URL: <http://mtop.rk.gov.ru/rus/index.htm/news/300719.htm>
40. Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Кузнецов П.Н. Установки для солнечной энергетики. моногр. М.: Издательство "Спутник+", 2017. - 177 с.
41. Кузнецов П.Н. Интеллектуальное устройство отбора максимальной мощности и согласования фотоэлектрических модулей // Сборник XIII Международный салон изобретений и новых технологий «Новое время». - 2017. - С. 31-32.
42. Кузнецов П.Н. Портативное автоматизированное устройство измерения характеристик и параметров фотоэлектрических преобразователей // Сборник XIII Международный салон изобретений и новых технологий «Новое время». - 2017. - С. 69-71.
43. Кузнецов П.Н. Разработка устройства повышения эффективности фотоэлектрических установок // Сборник статей научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017». - 2017. - С. 728-731.
44. Кузнецов П.Н., Авдеев Д.С. Разработка лабораторного макета устройства согласования фотоэлектрических модулей // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Электротехнические комплексы и системы". - 2017. - С. 45-46.

45. Кузнецов П.Н., Авдеев Д.С., Леметр Р.Ш., Егорушин В.О. Разработка инвертора синусоидального напряжения с автоматической синхронизацией с сетью для фотоэлектрической установки // Энергетические установки и технологии. - 2017. - №1. - С. 51-56.
46. Кузнецов П.Н., Сафонов В.А. Повышение эффективности работы фотоэлектрической станции // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. №3. С. 26-30.
47. Кузнецов П.Н., Юферев Л.Ю. Исследование повышения эффективности фотоэлектрических установок, работающих в условиях частичного затенения // Достижения науки и техники АПК. - 2018. - №1.
48. Кузнецов П.Н., Юферев Л.Ю. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении // Вестник аграрной науки Дона. - 2017. - №37. - С. 15-25.
49. Кузнецов П.Н., Юферев Л.Ю. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении // Вестник ВИЭСХ. - 2017. - №1 (26). - С. 90-97.
50. Левшов А.В., Федоров А.Ю. Математическое моделирование фотоэлектрических систем в Matlab/Simulink// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка та енергетика» №1 (14) – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – С. 153-158.
51. Методические рекомендации по нормированию труда на работы по обслуживанию и ремонту электрических сетей, электроэнергетических устройств и оборудования. - М.: Центр муниципальной экономики и права, 2005. - 358 с.
52. Москатов Е.А. Теория расчётов импульсных трансформаторов двухтактных ИИП и её подтверждение практикой // Радио. 2006. №6.
53. Назаров Б.И., Салиев М.А., Махмудов А.Н., Абдуллаев С.Ф. Влияние аэрозольного загрязнения атмосферы на работу солнечных приёмников //

Доклады Академии наук Республики Таджикистан. - Душанбе: Президиум Академии наук Республики Таджикистан, 2016. - С. 206-213.

54. Научно-прикладной справочник по климату СССР – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 10. Ч. 1-6. Многолетние данные – 605 с.

55. Несущие системы для солнечных панелей // ПИК-ЭНЕРГО URL: http://www.pik-energo.ru/fileadmin/user_upload/energo_downloads/Catalogs/Catalog_solar_support_2014_web.pdf

56. Новиков А.М. Научно-экспериментальная работа в образовательном учреждении. - 2 изд. - М.: Деловые советы, 1998. - 134 с.

57. Опыт строительства одной из крупнейших в мире СЭС // ПАО «РусГидро» [Электронный ресурс]. URL: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/f09/Sergey-Nadtochiy_ActivSolar.pdf

58. Охорзина, А.В. Системы слежения за Солнцем с применением ФЭД / А.В. Охорзина, М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Скороходов // Ползуновский вестник. – 2012. – №2/1. – С. 213-217.

59. Пат. KR20130041416 (A) Корея Photovoltaic power generation apparatus/ Park K. J., Kwon Y.B., Kang M.S. and Kim Y.I. Опубл. 04.25.2013

60. Патент РФ № 2016138181, 26.09.2016. Способ отбора электрической энергии от батарей фотоэлектрических преобразователей // Патент РФ № 2634590. 2017. Бюл. № 31. / Кузнецов П.Н., Борисов А.А.

61. Перечень квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии, с указанием местонахождения объекта и реквизитов юридического лица, которому принадлежит указанный объект // Ассоциация «НП Совет рынка» [Электронный ресурс]. URL: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_0v045642_28_12_17.xls

62. Перечень проектов ВИЭ, отобранных по результатам ОПВ, проведенного в 2013 году // АО «АТС» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>

63. Перечень проектов ВИЭ, отобранных по результатам ОПВ, проведенного в 2015 году // АО «АТС» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>
64. Перечень проектов ВИЭ, отобранных по результатам ОПВ, проведенного в 2014 году // АО «АТС» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>
65. Перечень проектов ВИЭ, отобранных по результатам ОПВ, проведенного в 2016 году // АО «АТС» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>
66. Петрусёв А. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью солнечного трекера и акрилового концентратора // Энергия знания URL: http://www.energyznanie.ru/media/uploads/projects/tekst%20raboty_2.pdf
67. План мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы// Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916>
68. Постановление Главы республики Хакасия «Схема и программа перспективного развития электроэнергетики в Республике Хакасия на 2016–2020 годы» от 16 мая 2016 г. №36-ПП// Официальный портал Правительства Республики Хакасия.
69. Постановление Губернатора Белгородской области «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Белгородской области на 2017-2021 годы» от 29 апреля 2016 г. №44// Официальный интернет-портал правовой информации №3100201605050001.
70. Развитие солнечной энергетики / Гимади В., Амирагян А., Поминова И. и др., под ред. Григорьев Л. - 44 изд. - М.: Аналитический центр при правительстве российской федерации, 2017. - 27 с.

71. Распоряжение Главы Республики Башкортостан «Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Республики Башкортостан на период 2016-2020 годы» от 29 апреля 2016 г. // Министерство промышленности и инновационной политики Республики Башкортостан. Уфа., 2016 г.
72. Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
73. Реализованные PV проекты ACTIV SOLAR // Официальный сайт международной компании Актив Солар URL: <http://www.activsolar.com/ru/products/pv-projects/>
74. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство /Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
75. Рускин В.А., Семёнов С.М., Диксон Р.К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.. - 2016. - №4. - С. 78-87.
76. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. 2 изд. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
77. Система электропитания космического аппарата: пат. 2396666 Рос. Федерация: МПК H02J7/34/ В.С. Кудряшов, В.О. Эльман, М.В. Нестеришин и др.; заявитель и патентообладатель ОАО "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва". – № 2009124704/09; заявл. 29.06.09; опубл. 10.08.10
78. Смирнов А.В. Повышение эффективности концентраторов солнечных энергетических установок с высоковольтными фотопреобразователями: дис. канд. техн. наук: 05.14.08 / Смирнов Александр Владимирович. – М., 2010. – 186 с.
79. Солнечные батареи инструкция по установке // Солнечная энергетика URL: http://instructions.sannycom.ru/manual_solar_panels.pdf

80. Справочник по климату СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – Вып. 26. – Ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – 2-ое изд. – 78 с.
81. Справочный центр PTC Mathcad // PTC eSupport URL: https://support.ptc.com/apps/help_center/brand=Mathcad
82. Средняя зарплата в Крыму в 2017 году // BANKIROS URL: <https://bankiros.ru/wiki/term/srednaa-zarplata-v-krymu>
83. Стаценко И.Н., Бурлаченко В.Ю., Иванов С.Д., Кузнецов П.Н. Универсальный измерительный модуль для определения технического потенциала солнечной тепловой и электрической энергии // Системы контроля окружающей среды. - 2016. - №3 (23). - С. 38-41.
84. Стельбанс Л.С. Физика полупроводников. - М.: Сов. Радио, 1967.
85. Стребков Д.С. Технологии крупномасштабной солнечной энергетики // Статьи о солнечной энергетике [Электрон. ресурс] / ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ). Апрель 2011
86. Стребков, Д.С. Концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович; под ред. Д.С. Стребкова. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.
87. Строительство солнечных электростанций в России [Электронный ресурс]: прессслужба компании "Хевел". Режим доступа: <http://www.hevelsolar.com/press/news/>
88. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики оренбургской области на период 2017-2021 годы от 22 апреля 2016 г.// Министерство экономического развития, промышленной политики и торговли Оренбургской области. 2016 г.
89. Тепловые расчёты гелиосистем / Сиворакша В.Ю, Марков В.Л, Петров Б.Е, Золотко К.Е, Стеценко Н.Н., - Днепропетровск: Издательство Днепропетровского университета, 2003. - 89 с.

90. Указ главы республики Алтай «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Республики Алтай на 2017-2021 годы» от 23 июня 2016 года N 178-у// Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/438958031>
91. Харченко В.В. Микросеть на основе ВИЭ для энергоснабжения сельских территорий / В. В. Харченко, В. Б. Адомавичюс, В. А. Гусаров, Д. С. Стребков // International conference «ENERGY OF MOLDOVA – 2012. REGIONAL ASPECTS OF DEVELOPMENT» October 4-6, 2012- Chisinau, Republic of Moldova – P 562 - 567.
92. Чуйков Р. Обзор отрасли и перспективы развития солнечной энергетики в России // Альтернативный киловатт. –2010. №2.
93. Экономика предприятия: учебник / И. Э. Берзинь, С. А. Пиунова, Н.Н. Савченко, С. Г. Фалько; под. ред. С. Г. Фалько. – М.: Дрофа, 2003. – 368 с.
94. Ярмухаметов У.Р. Имитационное моделирование режимов работы солнечных установок с фотоэлектрическими преобразователями в зависимости от внутренних и внешних факторов в среде MATLAB (Simulink)/ У.Р. Ярмухаметов, А.Т. Ахметшин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2014. – №8. – С.195-200.
95. Angrist S.W., Direct Energy Conversion, Allyn and Bacon, Inc., 4th edition, 1982, pp. 177-227.
96. Annsmol, J. and E.G. Stany, 2016. Reconfiguration of Solar Array under Partial Shaded Condition for Maximum Energy Harvesting. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 5, Issue 9: 7397-7402.
97. ATmega328 // Публичная информация Atmel Corporation URL: <http://www.atmel.com/devices/ATMEGA328.aspx>

98. Burning Arduino Bootloader with AVR USBASP // Tutorial by Cytron Technologies URL: <http://tutorial.cytron.com.my/2011/12/19/burning-arduino-bootloader-with-avr-usbasp/>
99. Christabel, S.C., D.P. Winston and B.P. Kumar, 2016. Reconfiguration solution for extracting maximum power in the aged solar PV systems. Journal of Electrical Engineering, 16: 440-446.
100. Dhar, S., R. Sridhar and V. Avasthy, Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. URL: www.iitk.ac.in/npsc/Papers/NPSC2012/papers/12118.pdf
101. E. Moyer Solar Photovoltaics EJM // GEOS24705. - Chicago: Department of the Geophysical Sciences, 2011.
102. Faranda R., Leva S. Energy comparison of MPPT techniques for PV System// WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS. June 2008; Issue 6, vol. 3: P. 446–455.
103. FGA25N120ANTD [Электронный ресурс] URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1774719.pdf>
104. Gevorkian P. Solar power generation Problems, Solutions, and Monitoring. - USA: Cambridge University Press, 2016.
105. Gow J. A., Manning C. D. «Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies» IEE Proceedings- Electric Power Applications. 1999; vol. 146, no. 2: 193-199.
106. High Performance Current Mode Controllers UC3842A // Semiconductor and Integrated Circuit Devices [Электронный ресурс] URL: http://www.onsemi.ru.com/pub_link/Collateral/UC3842A-D.PDF
107. Hua C. C., Shen C. M. Study of maximum power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system// Proceedings of 29th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1998; vol. 1: 86-93.
108. IRENA - International Renewable Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>

109. J. Movellan The 2016 Global PV Outlook: US, Asian Markets Strengthened by Policies to Reduce CO2 // Renewable Energy World. - 2016.
110. LM2596 Step-Down Voltage Regulator // Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments [Электронный ресурс] URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
111. Maki, A. and S. Valkealahti, 2012. Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions. IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: 27, Issue: 1: 173 - 183.
112. Martins, P., 2012. MPPT for a Photovoltaic Micro- Inverter. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
113. MAX44009 [Электронный ресурс] URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX44009.pdf>
114. Micro-Inverters vs. Central Inverters // Energy Informative [Электронный ресурс] URL: <http://energyinformative.org/are-solar-micro-inverters-better-than-central-inverters/>
115. MLX90615 [Электронный ресурс] URL: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90615-datasheet-melexis.pdf>
116. MLX90615 [Электронный ресурс] URL: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90615-datasheet-melexis.pdf>
117. Moyer E. Solar Photovoltaics EJM // GEOS24705. - Chicago: Department of the Geophysical Sciences, 2011.
118. Phang J.C.H., D.S.H. Chan, and J.R. Philips, Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters, Electronics Letters, vol. 20, no. 10, 1984, pp.406-408.
119. Renewable Energy // PowerWeb, a Forecast International Inc [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fi-powerweb.com/Renewable-Energy.html>

120. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Solar Photovoltaics. June, 2012. Volume 1: Power Sector Issue 4/5. «IRENA», United Arab Emirates June, 2012.
121. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Solar Power. June, 2012. Volume 1: Power Sector Issue 2/5. «IRENA», United Arab Emirates June, 2012.
122. Renewables 2014 Global Status report [Электронный ресурс]. URL: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf
123. Sah C.T., Noyce R.N., Shockley W. Carrier generation in p-n junctions and p-n junction Characteristics. – Proc. IRE, 1957, vol. 45, N8, p. 1228-1243.
124. Shenzhen Sunlite Technology Co.,Ltd [Электронный ресурс] URL: <http://best-force.com/>
125. Shockley W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. – Bell Syst. Techn. J., 1949, vol. 28. N3, p. 435-489.
126. Shubhankar, N.D. and B.D. Sumedh, 2015. Solar PV array reconfiguration under partial shading conditions for maximum power extraction using genetic algorithm. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43: 102-110.
127. Solar energy // International Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>
128. Sridhar, T. and J. Anish kumar, 2012. Development of Solar MPPT System Using Boost Converter with Microcontroller. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 1, Issue 4: 334-340.
129. Statistical review of world energy 2013 [Электронный ресурс]. URL: http://www.bp.com/content/dam/bp-country/es_es/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf

130. The Australian Microinverter Guide. The resource for Australian solar professionals looking for microinverter technology // Green Energy Options [Электронный ресурс] URL: http://greenenergyoptions.com.au/wp-content/uploads/2013/12/The_Australian_Microinverter_Guide.pdf
131. Tigo Energy Module Maximizer-ES (MM-ES) [Электронный ресурс] URL: https://uk.krannich-solar.com/fileadmin/content/data_sheets/accesories/Datasheet_Module_maximizer_ES.pdf
132. Tigo Energy, Inc. [Электронный ресурс] URL: <https://www.tigoenergy.com>
133. Villalva M.G., J.R. Gazoli, and E.R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.
134. Wasynczuk O., Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 9, 1983, pp. 3031-3037.
135. What is Maximum Power Point Tracking? // Northern Arizona Wind & Sun - Electricity from the sun [Электронный ресурс] URL: <http://www.solar-electric.com/mppt-solar-charge-controllers.html>
136. Wind And Solar Boost Cost-Competitiveness Versus Fossil Fuels [Электронный ресурс]. URL: <http://about.bnef.com/press-releases/windsolar-boost-cost-competitiveness-versus-fossil-fuels/>
137. Wirth H. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. - Germany: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2018. - 89 с.

Приложение А

Примеры записи и численного решение уравнений в СКА Mathcad Prime 3

$$\frac{q(U+I \cdot R_n)}{n(A \cdot k \cdot T)} - \ln \left(\frac{\beta_n \cdot I_\phi - 1000 \cdot I_0}{1000 \cdot I_0 \left(1 + \frac{q(U+I \cdot R_n)}{n(A \cdot k \cdot T)} \right)} \right) \xrightarrow{\text{solve}}$$

Рисунок А.1 – Запись уравнения нахождения численного значения напряжения в точке максимальной мощности в СКА Mathcad Prime 3

Начальные приближения	$\beta := 1000$	$T_{oc} := 298$	$k := 1.38 \cdot 10^{-23}$	$n := 60$	$A := 1.3$
	$I_{кз} := 8.65$	$q := 1.6 \cdot 10^{-19}$	$R_{\Gamma} := 0.45$	$T_c := 298$	$U_{xx} := 39$
Ограничения	$K_i := 0.005$	$K_u := -0.124$	$K_t := 0.033$	$\beta_c := 1000$	
	Начальные_приближения				
Решатель	$P := 1$	$I := 1$	$U := 1$	$I_\phi := 9$	$I_0 := 1.6 \cdot 10^{-7}$
	$T := T_{oc} + K_t \cdot \beta$				
$I_\phi = (I_{кз} + K_i \cdot (T - T_c)) \cdot \frac{\beta}{\beta_c}$					
$I_0 = \frac{I_\phi}{\exp \left(\frac{q \cdot (U_{xx} + K_u \cdot (T - T_c))}{n \cdot (A \cdot k \cdot T)} \right) - 1}$					
$I = I_\phi - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{q \cdot (U + I \cdot R_{\Gamma})}{n \cdot (A \cdot k \cdot T)} \right) - 1 \right)$					
$\frac{q \cdot (U + I \cdot R_{\Gamma})}{n \cdot (A \cdot k \cdot T)} - \ln \left(\frac{I_\phi - I_0}{I_0 \cdot \left(1 + \frac{q \cdot (U + I \cdot R_{\Gamma})}{n \cdot (A \cdot k \cdot T)} \right)} \right) = 0$					
$P = I \cdot U$					
$\text{minerr}(I, U, P) = \begin{bmatrix} 8.217 \\ 30.469 \\ 250.371 \end{bmatrix}$					

Рисунок А.2 – Пример вычисления параметров точки максимальной мощности используя СКА Mathcad Prime 3

Приложение Б

Копия патента на изобретение №2634590

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2634590

**Способ отбора электрической энергии от батарей
фотоэлектрических преобразователей**

Патентообладатель: *Кузнецов Павел Николаевич (RU)*

Авторы: *Кузнецов Павел Николаевич (RU),
Борисов Алексей Анатольевич (RU)*

Заявка № 2016138181

Приоритет изобретения 26 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 ноября 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 26 сентября 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иелиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 634 590** (13) **C1**(51) МПК
H02J 7/35 (2006.01)
G05F 1/67 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2016138181, 26.09.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.09.2016Дата регистрации:
01.11.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 26.09.2016

(45) Опубликовано: 01.11.2017 Бюл. № 31

Адрес для переписки:

299042, г. Севастополь, ул. Терлецкого, 22, кв. 2,
Кузнецов Павел Николаевич

(72) Автор(ы):

Кузнецов Павел Николаевич (RU),
Борисов Алексей Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Кузнецов Павел Николаевич (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: KR 20130041416 A, 25.04.2013. RU
2035109 C1, 10.05.1995. RU 2396666 C1,
10.08.2010.

(54) Способ отбора электрической энергии от батарей фотоэлектрических преобразователей

(57) Формула изобретения

1. Способ отбора электрической энергии от батарей фотоэлектрических преобразователей, включающий в себя параллельное соединение фотоэлектрических батарей, преобразование энергии солнечного излучения в электрическую энергию, отслеживание точки максимальной мощности и оптимизацию выходной мощности, отличающийся тем, что устанавливается дополнительный элемент питания для согласования батарей фотоэлектрических преобразователей и отбора максимальной мощности с установленными значениями напряжения и тока, соответствующими значению максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей, имеющий гальваническую развязку и получающий электрическую энергию от батарей фотоэлектрических преобразователей.

2. Способ отбора электрической энергии от батарей фотоэлектрических преобразователей, включающий в себя параллельное соединение фотоэлектрических батарей, преобразование энергии солнечного излучения в электрическую энергию, отслеживание точки максимальной мощности и оптимизацию выходной мощности, отличающийся тем, что устанавливается дополнительный элемент питания для согласования батарей фотоэлектрических преобразователей и отбора максимальной мощности с установленными значениями напряжения и тока, соответствующими значению максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей, в который подают электрическую энергию от внешнего источника электрической энергии.

3. Способ по п. 1 или 2, отличающийся тем, что напряжение дополнительного элемента питания устанавливают посредством электронно-вычислительного устройства.

4. Способ по п. 1 или 2, отличающийся тем, что напряжение дополнительного

RU 2 6 3 4 5 9 0 C 1

RU 2 6 3 4 5 9 0 C 1

элемента питания устанавливают вручную.

5. Способ по п. 1 или 2, отличающийся тем, что напряжение дополнительного элемента питания устанавливают на основании показаний датчиков тока, установленных в батарее фотоэлектрических преобразователей.

6. Способ по п. 1 или 2, отличающийся тем, что напряжение дополнительного элемента питания устанавливают на основании показаний датчика тока, установленного в общую цепь батарей фотоэлектрических преобразователей.

7. Способ по п. 1 или 2, отличающийся тем, что используют батареи фотоэлектрических преобразователей с разным номинальным напряжением.

8. Способ по п. 1 или 2, отличающийся тем, что часть фотоэлектрических преобразователей шунтируют диодами вследствие их затенения, загрязнения, выхода из строя.

R U 2 6 3 4 5 9 0 C 1

R U 2 6 3 4 5 9 0 C 1

Приложение В

Копия акта внедрения результатов диссертационного исследования

Общество с ограниченной ответственностью
"С.Энерджи-Севастополь"

ИНН/КПП 9204548232/920101001, ОГРН 1159204004805

299040,
г. Севастополь,
ул. Хрусталева, 44

телефоны: +79780968936

+79780968935

сайт: <http://s-energy.fo.ru>

«УТВЕРЖДАЮ»
 Главный инженер
 ООО «С.Энерджи-Севастополь»
 Забиякин А.С.
 2018 г.



А К Т

**о внедрении результатов диссертационного исследования
 Кузнецова Павла Николаевича «Повышение энергетической эффективности
 фотоэлектрических станций, работающих в условиях неравномерной
 освещенности»**

Результаты диссертационного исследования Кузнецова П.Н. на тему: *«Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических станций, работающих в условиях неравномерной освещенности»*, представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.14.08: *«Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии»*, внедрены на предприятии ООО «С.Энерджи-Севастополь» Солнечная электростанция на фотоэлектрических элементах, установленной мощностью 2,995 МВт, расположенной в г. Севастополе по ул. Богданова, 74.

Результатами исследования являются: *«Разработка эффективного способа отбора электрической энергии от фотоэлектрических установок, работающих в условиях неравномерной освещенности, а также его практическая реализация в виде «Интеллектуального устройства согласования массивов фотоэлектрических модулей» (УСФМ)»*.

УСФМ установлен в соединительном щите №4, что позволило значительно увеличить энергетическую эффективность массива фотоэлектрических модулей, работающего в условиях неравномерной освещенности, - при частичном затенении 2-х модулей из 18-ти *среднее увеличение их выработки электроэнергии составило 43,7%*.

Главный диспетчер
 ООО «С.Энерджи-Севастополь»


 Пынзарь Е.С.

Приложение Г

Копия акта внедрения результатов диссертационного исследования

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УТВЕРЖДАЮ
Директор института ядерной
энергии и промышленности
Ю.А. Омельчук
« » февраля 2018 года



А К Т

**о внедрении результатов диссертационного исследования
Кузнецова Павла Николаевича «Повышение энергетической
эффективности фотоэлектрических станций, работающих в условиях
неравномерной освещенности», представленного на соискание ученой
степени кандидата технических наук
по научной специальности 05.14.08 - Энергоустановки на основе
возобновляемых видов энергии**

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования Кузнецова Павла Николаевича «Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических станций, работающих в условиях неравномерной освещенности» в учебном процессе кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Института ядерной энергии и промышленности ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» при реализации образовательных программ направлений подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Нетрадиционная и возобновляемая энергетика».

Результаты исследования, изложенные в диссертации, имеют научное и практическое значение. В частности, используются при проведении лекционных, лабораторных и практических занятий следующих дисциплинах:

- Применение солнечной энергии;
- Информационно-управляющие системы и комплексы энергоустановок на основе ВИЭ;
- Энергетические установки на основе ВИЭ;
- Автоматическое управление и защита энергоустановок с ВИЭ;
- Теоретические основы альтернативной энергетики;
- Проектирование и эксплуатация солнечных и ветровых электростанций;
- Режимы использования установок ВИЭ;
- Перспективные схемы ветроэлектрических и солнечных станций.

Заведующий кафедрой

«Возобновляемые источники энергии
и электрические системы и сети»,
д.т.н., профессор

Якимович Б.А.

Доцент кафедры

«Возобновляемые источники энергии
и электрические системы и сети»,
к.т.н., доцент

Кувшинов В.В.

Доцент кафедры

«Возобновляемые источники энергии
и электрические системы и сети»,
к.т.н., доцент

Чебоксаров В.В.

Заведующая лабораторией

«Возобновляемые источники энергии»

Какушина Е.Г.

Приложение Д

Копия акта внедрения результатов диссертационного исследования

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «Эко Энерджи»
Лысов Егор Леонидович
Тел: +7-978-103-68-98
www.ecoenergy-russia.ru

АКТ

внедрения результатов диссертационных исследований

Результаты научно-практических исследований старшего преподавателя кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» **Кузнецова Павла Николаевича**, выполненные по теме кандидатской диссертации «Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических станций, работающих в условиях неравномерной освещенности», используются компанией ООО «Эко Энерджи» при проектировании новых и модернизации существующих фотоэлектрических энергоустановок.

Разработанные математические модели позволяют осуществить теоретический анализ энергетических и электрических характеристик фотоэлектрических установок с различными вариантами коммутации солнечных элементов и способами отбора электрической энергии от них при различных условиях освещенности, что позволило выбирать наиболее рациональное техническое решение из соображения получения максимальной энергетической эффективности для конкретных условий.

Внедрение на действующей СФУ разработанного устройства согласования массивов фотоэлектрических модулей, реализующего способ отбора электрической энергии от параллельно соединенных массивов

фотоэлектрических модулей с различной освещенностью, позволило значительно увеличить их энерговыработку, особенно при невысоких значениях высоты солнца (в зимнее время).

11.12.2017

Генеральный директор
ООО «Эко Энерджи»



Е.Л. Лысов

Приложение Е

Копия диплома XIII Международного салон изобретений и новых технологий «Новое время»



**XIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН ИЗОБРЕТЕНИЙ
И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ «НОВОЕ ВРЕМЯ»**

ДИПЛОМ

Награждается

за лучшее молодежное изобретение
***ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ОТБОРА МАКСИМАЛЬНОЙ
МОЩНОСТИ И СОГЛАСОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ***

П.Н. Кузнецов

(г. Севастополь, Российская Федерация)

Председатель Центрального совета
Всероссийского общества изобретателей
и рационализаторов



А.А. Ищенко

28 сентября 2017 г.
г. Севастополь

Приложение Ж

Копия диплома XIII Международного салон изобретений и новых технологий «Новое время»

IFIA
Founded 1968
INTERNATIONAL FEDERATION
OF INVENTORS' ASSOCIATIONS

XIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН
ИЗОБРЕТЕНИЙ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
«НОВОЕ ВРЕМЯ»

*Устойчивое развитие
во время перемен!*

Диплом
награждается
Золотой медалью

П.Н. Кузнецов
(г. Севастополь, Российская Федерация)
за разработку
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО
ОТБОРА МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ
И СОГЛАСОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МОДУЛЕЙ**

Президент
Международного жюри

Директор
МФАИ (IFIA)

Председатель
Центрального совета ВОИР

Генеральный
менеджер Салона

В.К. Петряшев **А.А. Ищенко** **В.А. Куликов**

Севастополь, Российская Федерация
28-30 сентября 2017 г.

Приложение 3

Копия диплома Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере

