

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи

Отто Артур Исаакович

АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ
РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Ю.А. Шиняков

Томск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	12
1.1 Структурные схемы автономных фотоэлектрических энергетических установок	12
1.2. Характеристики и режимы эксплуатации солнечных и аккумуляторных батарей	14
1.3 Энергопреобразующие устройства установок с фотоэлектрическими преобразователями солнечной энергии.....	27
1.4 Способы повышения энергетической эффективности установок с фотоэлектрическими преобразователями солнечной энергии.....	32
Выводы по главе 1	35
ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	37
2.1 Методы определения параметров и характеристик автономных фотоэлектрических энергетических установок	37
2.2 Методика проектирования автономных энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции	42
2.3 Сравнительный анализ энергетической эффективности и параметров автономных фотоэлектрических энергетических установок	50
Выводы по главе 2	54
ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ.....	56
3.1 Преобразователи мощности солнечных батарей.....	56
3.2 Способы регулирования максимума мощности солнечных батарей	64

3.3 Моделирование систем экстремального шагового регулирования мощности солнечной батареи	69
Выводы по главе 3	84
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ШАГОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ	86
4.1 Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей.....	86
4.2 Разработка контроллера заряда с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей	90
4.3 Экспериментальные исследования энергетической эффективности АФЭУ- 0,5.....	98
Выводы по главе 4	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Коэффициент преобразования падающей солнечной энергии современных автономных фотоэлектрических энергетических установок не превышает 5 -10%. В ясную, солнечную погоду на каждый квадратный метр площади, перпендикулярной к солнечному вектору, падает до 1 кВт солнечной энергии, но с выхода автономных фотоэлектрических энергетических установок к потребителю поступает значительно меньшее количество энергии. Факторами, уменьшающими количество преобразованной энергии, являются невысокий КПД, широко используемых в наземных энергетических установках кремниевых солнечных батарей (СБ) (монокристаллические 17–23%, поликристаллические 12–15%, аморфные 6–8%), и недоиспользование генерирующих возможностей солнечной батареи.

Недоиспользование энергии солнечных батарей до 30% объясняется отсутствием у большинства автономных фотоэлектрических энергетических установок (АФЭУ) систем регулирования максимума мощности СБ, хотя целесообразно их использование при проектировании и создании АФЭУ, как с подвижными (система автоматического наведения СБ на Солнце), так и неподвижными солнечными батареями.

Известен ряд способов экстремального регулирования мощности (ЭРМ) солнечных батарей, но в настоящее время не исследовано преимущество какого-либо из них в отношении систем на основе фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Также не определено оптимальное соотношение параметров системы ЭРМ СБ.

Для определения структуры и параметров фотоэлектрических энергетических установок существует ряд методик, представленных в основном на сайтах производителей. Эффективность и адекватность результатов таких методик ничем не подтверждена и зачастую направлена на увеличение размеров и стоимости АФЭУ с целью искусственного завышения цены и получения выгоды.

В настоящей диссертационной работе поставлена и решена задача повышения энергетической эффективности автономных энергетических установок на основе фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии за счет реализации экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей и расчета параметров АФЭУ с учетом энергобаланса и статистических значений графика инсоляции конкретной местности.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются автономные энергетические установки на основе фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей.

Предметом исследования является способ экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей и методика проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок.

Цель и задачи диссертационного исследования

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности автономной фотоэлектрической энергетической установки с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

- исследовать структуры автономных энергетических установок на основе фотоэлектрических преобразователей;
- провести анализ методов расчета технических параметров автономных фотоэлектрических энергетических установок;
- разработать методику проектирования АФЭУ на основе расчета энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности;
- провести анализ способов и алгоритмов регулирования экстремума мощности солнечных батарей;

- разработать систему экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей;
- разработать и изготовить контроллер заряда аккумуляторных батарей с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей;
- провести исследования параметров экстремального регулирования мощности солнечных батарей на имитационной модели в *MatLab Simulink*;
- провести экспериментальные исследования и обоснование технических характеристик и параметров контроллера заряда аккумуляторных батарей;
- провести экспериментальные исследования технических характеристик АФЭУ с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей.

Достоверность полученных результатов, в диссертации, подтверждается сравнением данных, полученных при моделировании и расчетным путем, с результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна работы

1. Предложена методика проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности, позволяющая оптимизировать структуру и технические параметры энергетической установки.
2. Результаты сравнительного анализа способов повышения энергетической эффективности автономных фотоэлектрических установок, подтверждающие целесообразность применения систем экстремального регулирования мощности солнечных батарей.
3. Результаты имитационного моделирования автономной фотоэлектрической энергетической установки с заданными параметрами, полученными на основе реальных экспериментальных исследований.

4. Получены результаты экспериментальных исследований, обосновывающие рациональную величину шага ЭРМ не более 1 вольта по напряжению СБ, частоту регулирования 1-2 Гц и эффективность экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей выше 98%.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработана система экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей, обеспечивающая высокие энергетические и эксплуатационные характеристики:

- коэффициент энергетической эффективности солнечной батареи выше 98%;
- устойчивый поиск точки максимальной мощности ВАХ СБ.

2. Разработан и создан контроллер заряда АБ с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей, обеспечивающий повышение энергетической эффективности АФЭУ до 30%.

3. Получены практические результаты для расчета технических характеристик контроллера заряда аккумуляторных батарей с ЭРМ СБ и методики проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок.

4. Предложены практические рекомендации по проектированию и эксплуатации фотоэлектрических энергетических установок.

Практическая ценность подтверждена патентами на полезную модель и изобретения.

Методы исследований

В ходе выполнения работы использовались элементы теории автоматического управления, положения общей теории цепей и теории алгебраических уравнений. Применялась графическая среда имитационного моделирования *MatLab Simulink* для построения энергетических систем, а также программы инженерного расчета для составления таблиц, диаграмм и вычисления функций - *MathCad* и *Microsoft Excel*. Проверка основных теоретических

положений осуществлялась путем экспериментальных исследований на реальной фотоэлектрической энергетической установке.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Основные научные результаты, полученные соискателем, соответствуют пункту 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

На защиту выносятся

1. Методика проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности.
2. Система шагового поиска точки максимальной мощности вольт-амперной характеристики соленой батареи, повышающая энергетическую эффективность АФЭУ до 30%.
3. Цифровой экстремальный шаговый регулятор с шагом не более 1 вольта по напряжению СБ, частотой регулирования 1-2 Гц и энергетической эффективностью солнечной батареи выше 98%.
4. Результаты экспериментальных исследований автономной фотоэлектрической энергетической установки с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей.

Реализация результатов работы

Основные научно-практические результаты были получены автором при выполнении следующих проектов:

1. Х/Д 18/15, в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218, и договора между АО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0182ОКР «Разработка цифрового управляющего и силовых модулей

энергопреобразующего комплекса для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов»;

2. Государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект №8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования»;

3. Федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по темам:

- «Разработка и создание автономных фотоэлектрических энергетических установок с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей» от 01 сентября 2010 года №16.740.11.0067;

- «Разработка и создание автономных энергетических установок с автоматическим слежением фотоэлектрических панелей за солнцем» от 12 октября 2012 года № 14.В37.21.1493;

- «Разработка контроллера заряда-разряда аккумуляторных батарей, обеспечивающего экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автономных фотоэлектрических энергетических установок»;

4. Программ стратегического развития Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, проекты:

- «Разработка и создание автономных энергетических установок с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей и автоматическим слежением фотоэлектрических панелей за солнцем» (подпроект 2.3.1.4, 01.01.2012 - 30.11.2013);

- «Исследование и разработка интеллектуальных высоковольтных систем электропитания космических аппаратов с повышенной энергетической эффективностью на основе регулируемых высокочастотных инверторно-трансформаторных преобразователей» (подпроект 2.3.1.2, 01.01.2014-25.12.2014).

Личный вклад автора

Материалы диссертации являются обобщением работ автора, выполненных в период с 2012 по 2018 год, и отражают его личный вклад в решаемую задачу. Опубликованные работы написаны в соавторстве с научным руководителем и другими авторами. Совместно с научным руководителем выполнена постановка задач диссертационного исследования, анализ и обсуждение результатов теоретических и практических исследований. Автором разработан и изготовлен контроллер заряда аккумуляторных батарей с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей, проведены экспериментальные исследования и обоснованы технические характеристики АФЭУ, предложена методика проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIV международном студенческом научно – техническом семинаре «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», на I Всероссийской конференции «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения», а также на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2012». Научно-технические совещания программы стратегического развития Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по проекту «Разработка и создание автономных энергетических установок с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей и автоматическим слежением за солнцем»

Публикации

Основное содержание диссертационной работы отражено в 11 печатных работах, из них 5 в изданиях, рекомендуемых ВАК, 1 статья, индексируемая в

базе Scopus, 3 публикации в трудах и сборниках конференций, 1 патент РФ на полезную модель и 1 патент РФ на изобретение, список которых приведен в автореферате.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 74 иллюстрации и 9 таблиц.

ГЛАВА 1. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В главе приведен обзор структурных схем автономных фотоэлектрических энергетических установок и их элементов. Рассмотрены характеристики, режимы эксплуатации солнечных и аккумуляторных батарей, а также энергопреобразующие устройства установок с фотоэлектрическими преобразователями солнечной энергии.

Выявлены основные принципы проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок и способы повышения их энергетической эффективности.

1.1 Структурные схемы автономных фотоэлектрических энергетических установок

Автономные фотоэлектрические энергетические установки в общем случае состоят из массива фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), аккумуляторных батарей (АБ), инвертора – преобразователя постоянного напряжения в переменное (если необходимо потребителю), и контроллера заряда-разряда аккумуляторных батарей (КЗАБ). Соединение данных элементов системы производится согласно структурной схеме АФЭУ, представленной на рисунке 1.1.

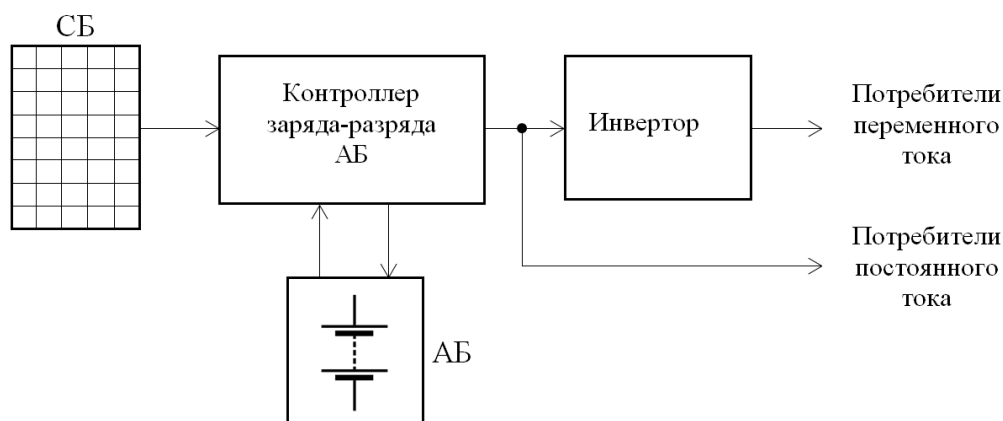


Рисунок 1.1 – Структурная схема автономной фотоэлектрической энергетической
установки

В зависимости от места расположения и условий эксплуатации в состав фотоэлектрической установки могут вводиться дополнительные источники энергии: ветрогенератор и дизельгенератор (бензогенератор). Структурная схема такой гибридной АФЭУ представлена на рисунке 1.2, где ДГ – дизельгенератор, ВГ – ветрогенератор. Подключение дополнительных элементов системы производится аналогично, через контроллер.

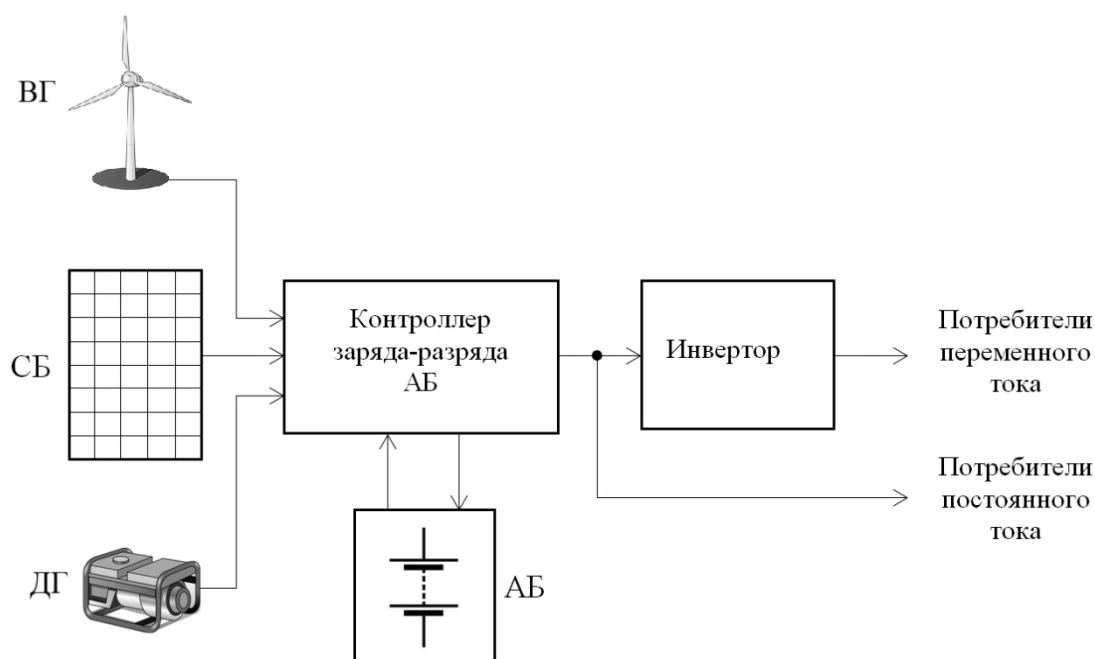


Рисунок 1.2 – Структурная схема гибридной энергетической установки

Известна структура фотоэлектрической установки [1] (рисунок 1.3), в которой реализовано как экстремальное регулирование мощности солнечных батарей, так и автоматическое наведение СБ на Солнце. На схеме приняты следующие обозначения: СБ – солнечная батарея; КНС – контроллер наведения СБ на Солнце; ДШД1, ДШД2 – драйверы управления шаговыми двигателями; М1, М2 – шаговые двигатели; Р1 – Р4 – редукторы; КЗАБ – контроллер заряда аккумуляторных батарей; И – инвертор; АБ – аккумуляторная батарея.

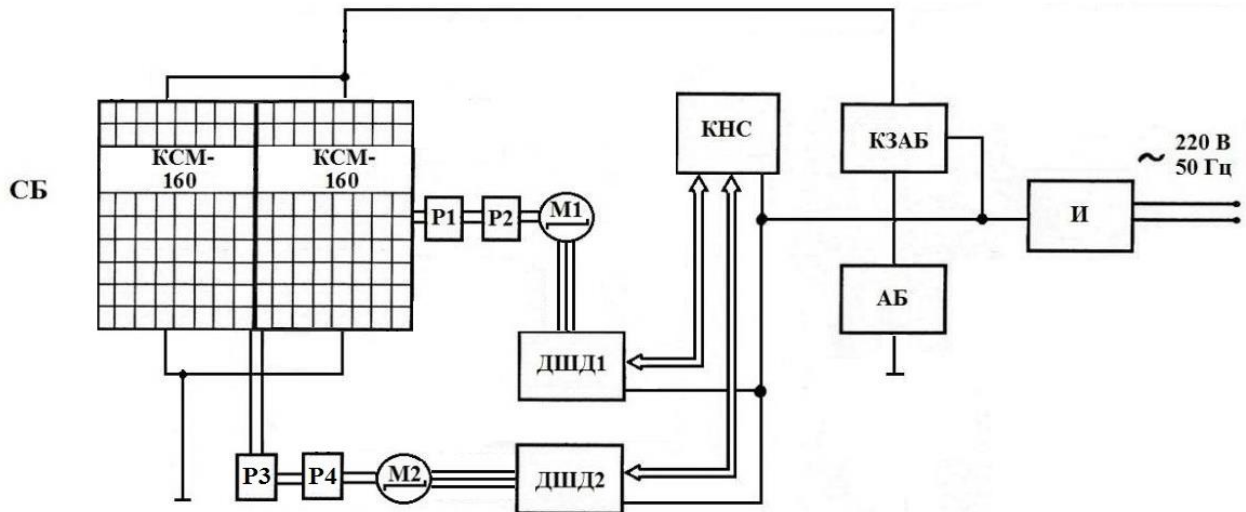


Рисунок 1.3 – Структурная схема АФЭУ с функцией наведения солнечных батарей на Солнце и экстремальным регулированием мощности СБ

Состав и структура фотоэлектрической установки в основном зависят от условий эксплуатации и требований конечного потребителя. В настоящее время известны различные методы определения структуры, параметров и характеристик АФЭУ. В основном это методики или автоматические программы расчета, представленные в интернет-магазинах фирм-производителей и поставщиков энергетических установок, которые не оптимальны и зачастую искусственно увеличивают состав и стоимость АФЭУ для выгоды поставщика.

1.2. Характеристики и режимы эксплуатации солнечных и аккумуляторных батарей

Солнечные батареи – основная часть фотоэлектрической энергетической установки. Преобразование энергии в ФЭП основано на фотоэлектрическом эффекте, возникающем при воздействии солнечного излучения в неоднородных полупроводниковых структурах [2].

Неоднородность структуры ФЭП может быть получена легированием одного и того же полупроводника различными примесями (создание p-n переходов) или путем соединения различных полупроводников с неодинаковой шириной

запрещенной зоны - энергии отрыва электрона из атома (создание гетеропереходов), или же за счет изменения химического состава полупроводника, приводящего к появлению градиента ширины запрещенной зоны. Возможны также различные комбинации перечисленных способов.

Эффективность преобразования зависит от электрофизических характеристик неоднородной полупроводниковой структуры, а также оптических свойств ФЭП, среди которых наиболее важную роль играет фотопроводимость. Она обусловлена явлениями внутреннего фотоэффекта в полупроводниках при облучении их солнечным светом.

Потери энергии в фотоэлектрических преобразователях связаны:

- с отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя;
- прохождением части излучения через ФЭП без поглощения в нем;
- рассеянием на тепловых колебаниях решетки избыточной энергии фотонов;
- рекомбинацией образовавшихся фото-пар на поверхностях и в объеме ФЭП;
- сопротивлением ФЭП;
- другими физическими процессами.

Для уменьшения потерь энергии в ФЭП проводятся следующие мероприятия:

- создание текстурированной фронтальной поверхности;
- использование полупроводников с оптимальной для солнечного излучения шириной запрещенной зоны;
- направленное улучшение свойств полупроводниковой структуры путем ее оптимального легирования и создания встроенных электрических полей;
- переход от гомогенных к гетерогенным и варизонным полупроводниковым структурам;
- оптимизация конструктивных параметров ФЭП (глубины залегания р-п-перехода, толщины базового слоя, частоты контактной сетки и др.);
- применение многофункциональных оптических покрытий, обеспечивающих просветление, терморегулирование и защиту ФЭП от космической радиации;

- разработка ФЭП, прозрачных в длинноволновой области солнечного спектра за краем основной полосы поглощения;
- создание каскадных ФЭП из специально подобранных по ширине запрещенной зоны полупроводников, позволяющих преобразовывать в каждом каскаде излучение, прошедшее через предыдущий каскад;
- создание преобразователей с двухсторонней чувствительностью (до +80 % к уже имеющемуся КПД одной стороны);
- применения люминесцентно переизлучающих структур;
- предварительное разложение солнечного спектра на две или более спектральные области с помощью многослойных пленочных светоделителей (дихроичных зеркал) с последующим преобразованием каждого участка спектра отдельным ФЭП.

В фотоэлектрических энергетических установках можно использовать разные типы ФЭП, но не все они удовлетворяют комплексу требований к таким системам:

- высокая доступность сырья и возможность организации массового производства;
- приемлемые с точки зрения сроков окупаемости затрат на создание системы преобразования;
- высокая надежность при длительном ресурсе работы;
- удобство техобслуживания.

В настоящее время на рынке солнечных батарей для наземных фотоэлектрических энергетических установок представлены несколько различных видов фотоэлектрических преобразователей. Они делятся на две основные группы: кремневые и пленочные. Кремниевые в свою очередь можно разделить на поликристаллические, монокристаллические и аморфные. Пленочные изготавливаются на основе теллурида кадмия (CdTe), селенида меди-индия (CuInSe_2) – полимерные [3].

Наибольшее применение в наземных АФЭУ получили ФЭП на основе кремния. Объясняется это широким распространением кремния в земной коре, его

относительной дешевизной и относительно высоким показателем производительности в сравнении с некоторыми другими видами солнечных батарей.

Монокристаллические СБ представляют собой силиконовые ячейки, объединенные между собой. Для их изготовления используют максимально чистый кремний. После затвердевания готовый монокристалл разрезают на тонкие пластины толщиной 250-300 мкм, которые пронизывают сеткой из металлических электродов. Используемая технология является сравнительно дорогостоящей, поэтому и стоят монокристаллические батареи дороже, чем поликристаллические или аморфные. Выбирают данный вид солнечных батарей за высокий показатель КПД (17-22%) [4].

Для получения поликристаллов кремниевый расплав подвергается медленному охлаждению. Такая технология требует меньших энергозатрат, следовательно, и себестоимость кремния, полученного с ее помощью, меньше. Единственный минус – поликристаллические солнечные батареи имеют более низкий КПД (13-16%) [3].

В фотоэлектрических преобразователях на основе аморфного кремния используется не кристаллический кремний, а силан, или кремневодород, который тонким слоем наносится на материал подложки. КПД таких батарей составляет всего 5-6%

Солнечные батареи на основе теллурида кадмия являются одними из самых перспективных в наземной солнечной энергетике. Значение КПД составляет порядка 11%, по сравнению с кремнием эта цифра меньше, но стоимость ватта мощности таких СБ на 20-30% меньше, чем у кремниевых [5].

Солнечная батарея на основе селенида меди-индия способна превратить 15-18% падающего на нее солнечного излучения в электрическую энергию. Как видно, по КПД этот вид мало чем отстает от монокристаллической кремниевой батареи.

В качестве светопоглощающих материалов в полимерных солнечных батареях используются органические полупроводники, такие как полифенилен, углеродные фуллерены, фталоцианин меди и другие. Полимерные солнечные

батареи имеют на сегодняшний день КПД 5-6%. Но их главными достоинствами считаются низкая стоимость производства, низкая масса, отсутствие вредного воздействия на окружающую среду. Применяются полимерные батареи в областях, где наибольшее значение имеет механическая эластичность и экологичность утилизации [6].

Существуют солнечные батареи на основе арсенида галлия. Самые современные гетероструктурные арсенид-галлиевые ФЭП обеспечивают преобразование падающей солнечной энергии в электрическую с КПД 35-40%, а трехслойные арсенид-галлиевые 45%. Но эти высокоэффективные панели не могут массово использоваться в наземных АФЭУ из-за высокой стоимости [7].

Солнечные батареи автономных фотоэлектрических энергетических установок используются при значительно изменяющихся условиях эксплуатации, они сильно подвержены влиянию окружающей среды [8].

Вольт-ваттные характеристики (ВВХ) имеют ярко выраженный максимум генерируемой мощности, положение которого существенно изменяется от условий эксплуатации (ресурса, температуры, освещенности) [8-11].

Основное воздействие на ВВХ фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии оказывают степень освещенности и температура. Освещенность ФЭП падает при изменении ориентации по отношению к Солнцу, то есть при появлении угла α между солнечным вектором и вектором нормали к панелям СБ. При угле $\alpha > 180^\circ$ и попадании в тень освещенность падает практически до нулевого значения. Пропорционально изменению освещенности изменяется и ток СБ (рисунок 1.4) [9].

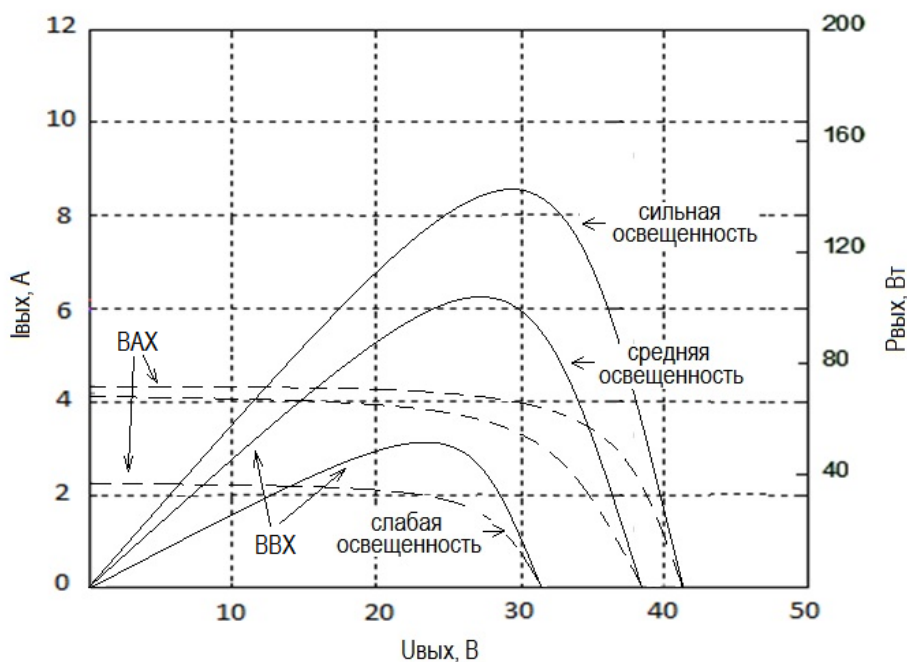


Рисунок 1.4 – ВАХ и ВВХ модуля КСМ-160 при разной степени освещенности
(Освещенность: сильная – 950 Вт/м^2 ; средняя – 650 Вт/м^2 ; слабая – 300 Вт/м^2)

Частичное затенение СБ ведет к уменьшению ее мощности, а также к возникновению высоких обратных напряжений на затененных и параллельно с ними соединенных фотопреобразователях, перегреву и деградации СБ [12]. Даже при полном устранении негативного влияния частичных затенений и электризации, прогнозируемое уменьшение мощности СБ может составлять 15 -20 % к концу пятого года эксплуатации, и 30 % после 10 лет работы СБ [13].

Наиболее существенные изменения ВАХ происходят в момент выхода Солнца из-за облаков после длительного затенения панелей. В летнее время, при средней температуре 20-25 градусов тепла и отсутствии ветра, температура панелей солнечной батареи может повыситься до 50-70 градусов. В этом случае напряжение холостого хода и оптимальной рабочей точки может уменьшиться на 25%. Время прогрева панелей СБ зависит от конструкции и расположения, и как правило, не превышает 20 минут [14].

При интенсивности освещения, соответствующей солнечной, фото ЭДС преобразователей из кремния линейно падает при увеличении температуры с градиентом 1,5-2,5 мВ/К [12]. При изменении температуры от плюс 70 °С до минус

30 °С напряжение оптимальной рабочей точки кремниевой СБ увеличивается ориентировочно в 1,5 раза (напряжение кремниевого фотоэлемента изменяется в диапазоне 0,5-0,75 В) [11].

Изменение температуры панелей СБ ведет к смещению ВАХ вдоль оси напряжения. При этом ток СБ незначительно зависит от температуры (рисунок 1.5).

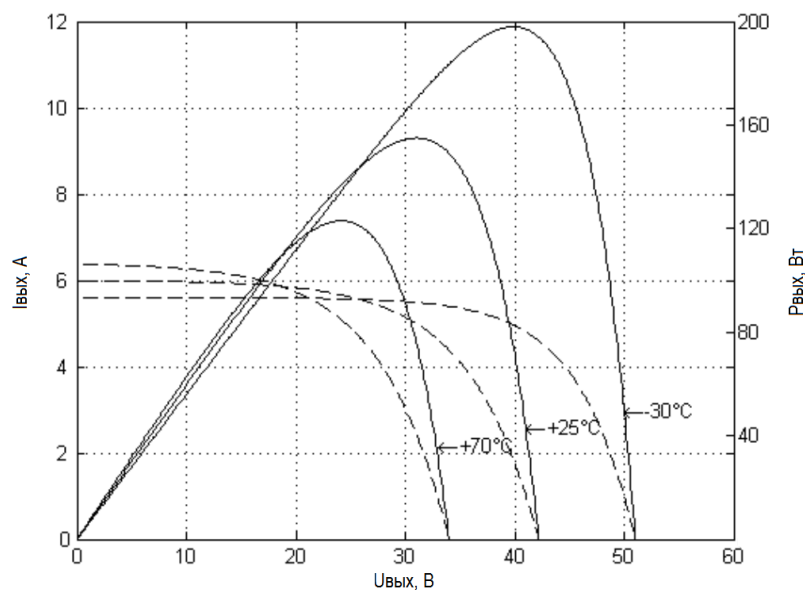


Рисунок 1.5 – ВАХ и ВВХ модуля КСМ-160 в температурном диапазоне минус 30 - плюс 70 °С

Другими факторами, влияющими на параметры СБ, являются радиационные воздействия, механические повреждения и электризация.

Аккумуляторные батареи являются неотъемлемой частью АФЭУ и служат для накопления электрической энергии и отдачи ее потребителю в темное время суток, а также при недостатке солнечной энергии (например, в пасмурную погоду). Время автономной работы фотоэлектрической установки определяется емкостью аккумуляторных батарей. Кроме емкости, важнейшими параметрами аккумуляторов АФЭУ являются максимальное число циклов заряда/разряда и срок службы.

Выбор аккумуляторной батареи с большим жизненным ресурсом - сложная проблема при разработке АФЭУ из-за агрессивной электрохимической природы АБ, большой зависимости их характеристик от условий эксплуатации, способов

заряда, методов контроля параметров и защиты аккумуляторов. Основные требования, предъявляемые к аккумуляторным батареям АФЭУ:

- электропитание от аккумуляторных батарей в течении темного времени суток (определяется емкостью АБ);
- максимально короткое время заряда;
- возможность частичного разряда с последующим дозарядом;
- надежность и отсутствие технического обслуживания в течение всего срока службы системы;
- отсутствие необходимости в специальном помещении или системе вентиляции;
- вес и габариты (как правило, не критичны).

По режиму эксплуатации аккумуляторные батареи можно условно разделить на группы [15]:

- для работы в буферном режиме (периоды разряда батареи, по сравнению с периодами заряда непродолжительны);
- для работы в циклическом режиме (циклы заряда и разряда постоянно чередуются);
- стартерные - используются для запуска различных двигателей (для данного режима характерен кратковременный разряд большим током).

В АФЭУ аккумулятор функционирует в циклическом режиме с неполным разрядом в течение суток и в буферном режиме – в течении светового (солнечного) дня. По типу активных компонентов АБ можно разделить:

- на серебряно-цинковые (Ag-Zn);
- серебряно-кадмиевые (Ag-Cd);
- никель-железные (Ni-Fe);
- никель-кадмиевые (Ni-Cd);
- никель-металлогидридные (Ni-MH);
- свинцово-кислотные;
- литий-ионные (Li-Ion);
- литий-полимерные (Li-polymer);

- гелевые;

Ниже подробнее рассмотрен каждый из типов АБ.

Серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые аккумуляторы

Активными материалами данных АБ служат оксид серебра на положительном, и цинк или кадмий – на отрицательном электродах соответственно, электролитом является раствор щелочи. Характеризуются высокой удельной энергией, низким саморазрядом, но весьма дороги, а также имеют низкий ресурс. У энергоемких аккумуляторных батарей серебряно-цинковой электрохимической системы (90-120 Вт·ч/кг) при увеличении числа циклов заряда - разряда емкость существенно падает, и при 103-104 циклах составляет не более 30 % от начальной. Применяются в основном для питания портативных приборов и аппаратов в военной технике [16].

Никель-кадмиевые (Ni-Cd) аккумуляторы

Реагентами в никель-кадмиевых аккумуляторах служат гидроксид никеля и кадмий, электролитом - раствор гидроксида калия, поэтому они относятся к щелочным аккумуляторам. Существуют три основных вида никель-кадмиевых аккумуляторов: негерметичные с ламельными (ламельные аккумуляторы) и спеченными электродами (безламельные аккумуляторы) и герметичные [17]. Наиболее дешевые ламельные никель-кадмиевые аккумуляторы характеризуются плоской разрядной кривой, высокими ресурсом и прочностью, но низкой удельной энергией. Удельная энергия, скорость разряда Ni-Cd аккумуляторов со спеченными электродами выше, они работоспособны при низких температурах, но дороже, характеризуются эффектом памяти и способностью к тепловому разгону.

Герметичные Ni-Cd аккумуляторы характеризуются горизонтальной разрядной кривой и способностью функционировать при низких температурах. Недостатком данного типа аккумуляторов является применение токсичного кадмия.

Для Ni-Cd аккумуляторов предпочтителен быстрый заряд и медленный разряд до состояния полного разряда. Также необходим полный периодический разряд: иначе на пластинах элементов формируются крупные кристаллы,

значительно снижающие их емкость (так называемый "эффект памяти"). Применяются для питания стационарного оборудования, средств связи, запуска дизелей и авиационных двигателей и т.п.

Никель-железные аккумуляторы

В этих аккумуляторах используется железо. Из-за выделения водорода с самого начала заряда эти аккумуляторные батареи производят только в негерметичном варианте. Они дешевле никель-кадмиевых, имеют длинный срок службы и высокую механическую прочность. Но характеризуются высоким саморазрядом, низкой отдачей по энергии, практически неработоспособны при температуре ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Используются в основном как тяговые источники тока в шахтных электровозах, электрокарах и промышленных подъемниках [18].

Никель-металлогидридные аккумуляторы (Ni-MH)

Активным материалом отрицательного электрода является интерметаллид, обратимо сорбирующий водород, т.е., фактически, отрицательный электрод является водородным электродом, у которого восстановленная форма водорода находится в абсорбированном состоянии. Разрядная кривая Ni-MH аккумулятора аналогична кривой Ni-Cd аккумулятора. Удельная емкость и энергия никель-металлогидридных аккумуляторов в 1,5-2 раза выше удельной энергии никель-кадмиевых аккумуляторов, кроме того, они не содержат токсичный кадмий. Применяются для питания портативных приборов и аппаратуры.

Свинцово-кислотные аккумуляторы

Свинцовые АБ являются наиболее распространенными среди всех, существующих в настоящее время химических источников тока. Их масштабное производство определяется как относительно низкой ценой, обусловленной сравнительной не дефицитностью исходных материалов, так и разработкой разных вариантов этих аккумуляторов, отвечающих требованиям широкого круга потребителей.

На электрических и эксплуатационных характеристиках, герметизированных свинцовых аккумуляторных батарей большой емкости значительно сказываются различия в конструкции электродов (поверхностного типа, панцирные или

стержневые), а также различия в сплавах, используемых для изготовления токоведущих основ.

Герметизированные свинцовые аккумуляторные батареи работоспособны в интервале температур от -30 до $+50$ °С, чаще гарантируется работоспособность при температуре не ниже -15 °С. При более низких температурах возможности разряда мешает замерзание электролита. Работоспособность аккумуляторов при низких температурах может быть обеспечена увеличением концентрации электролита, как это и делается в специальных аккумуляторах.

Саморазряд в данном типе аккумуляторов составляет 40% в год при 20 °С и 15% при 5 °С. При более высоких температурах хранения саморазряд увеличивается (при 40 °С батареи лишаются 40 % емкости за 4-5 месяцев).

Самое большое влияние на срок службы герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора оказывают: рабочая температура, глубина разряда и величина перезаряда. Перезаряд также вреден для свинцово-кислотных батарей, как и перезаряд. При многократных перезарядах уменьшается разрядная емкость и понижается срок службы аккумулятора. Такие же изменения могут происходить и при продолжительном хранении батарей в разряженном состоянии.

Современные герметизированные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи обладают достаточно высокими удельными энергетическими характеристиками (до 40 Вт·ч/кг и 100 Вт·ч/л). Они работоспособны в буферном режиме при нормальной температуре в течение продолжительного периода (более 10 лет), а при циклировании обеспечивают несколько сотен циклов при потере до 20 % емкости [17].

Литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы

Большинство Li-ion аккумуляторов изготавливают в призматических вариантах, поскольку основное их назначение - обеспечение работы сотовых телефонов и ноутбуков. Конструкция отличается абсолютной герметичностью, это требование определяется как недопустимостью вытекания жидкого электролита (отрицательно действующего на аппаратуру), так и недопустимостью попадания в аккумулятор кислорода и паров воды из окружающей среды. Кислород и пары воды

реагируют с материалами электродов и электролита и полностью выводят аккумулятор из строя.

Технологические операции производства электродов и других деталей, а также сборку аккумуляторов проводят в особых сухих комнатах или в герметичных боксах в атмосфере чистого аргона. При сборке аккумуляторов применяют сложные современные технологии сварки, конструкции гермовыводов и т.д.

С ростом тока разряда емкость аккумулятора снижается незначительно, но уменьшается рабочее напряжение. Такой же эффект появляется в разряде при температуре ниже 10 °С. Кроме этого, при низких температурах имеет место начальная просадка напряжения.

При циклировании Li-ion аккумуляторов среди возможных механизмов снижения емкости наиболее часто рассматриваются следующие:

- разрушение кристаллической структуры катодного материала;
- расслоение графита;
- осаждение металлического лития;
- механические изменения структуры электрода в результате объемных колебаний активного материала при циклировании.

Обычно ресурс коммерческих Li-ion аккумуляторов до понижения разрядной емкости на 20% составляет 500-1000 циклов. С уменьшением глубины циклирования ресурс повышается. Наблюдаемое повышение срока службы связывают с уменьшением механических напряжений, вызываемых, изменениями объема электродов внедрения, которые зависят от степени их заряженности [17].

Преимуществами Li-ion аккумуляторов являются: малый вес; высокая емкость; большие отдаваемые токи; незначительный «эффект памяти»; низкий уровень саморазряда – не более 5% в месяц; возможность быстрого заряда.

Недостатки: узкий температурный рабочий диапазон, при котором емкость и отдаваемый ток остается на приемлемом уровне (требуют аккуратной и бережной эксплуатации); ограниченный срок службы.

Литий-полимерные (Li-pol) аккумуляторы

В основе идеи литий-полимерного аккумулятора лежит открытое явление перехода некоторых полимеров в полупроводниковое состояние в результате внедрения в них ионов электролита. Проводимость полимеров при этом увеличивается более чем на порядок.

Современные литий-полимерные аккумуляторы обеспечивают удельные характеристики, сравнимые с характеристиками литий-ионных аккумуляторов. Благодаря отсутствию жидкого электролита, они более безопасны в использовании, чем перезаряжаемые литиевые источники тока. Li-pol аккумуляторы компактны и могут быть выполнены в любой конфигурации.

Рабочие плотности тока незначительны, и электрические характеристики Li-pol аккумуляторов заметно ухудшаются при понижении температуры из-за кристаллизации полимера.

Для снижения внутреннего сопротивления Li-pol батарей используют добавку гелевого электролита. Большинство применяемых литий-полимерных батарей, на самом деле являются гибридными, представляющими собой нечто среднее между литий-ионными и литий-полимерными аккумуляторами, в которых используется гелевый электролит. Процесс заряда подобен заряду литий-ионных.

Гелевые

Гелевый аккумулятор - это вариант необслуживаемого свинцово-кислотного аккумулятора. Он снабжен клапаном, который открывается для выброса излишне накопленного газа, в основном водорода. Это герметизированный аккумулятор (не герметичный - небольшое выделение газов при открытии клапана все-таки происходит), полностью необслуживаемый, с гелеобразным кислотным электролитом.

Электролит, загущенный с помощью силикагеля, во время эксплуатации АБ постепенно твердеет. Пары водорода и кислорода задерживаются внутри вещества и, реагируя между собой, превращаются в воду, которая стекает по стенкам аккумулятора, увлажняя гель. Таким образом, почти все испарения возвращаются обратно в аккумулятор. Но часть испарений рекомбинировать не удастся, и при

избыточном давлении газ сбрасывается через предохранительные клапаны. В процессе эксплуатации гелевых аккумуляторов, из-за неизбежных потерь воды при открывании клапана, происходит осушение геля и увеличение внутреннего сопротивления источников тока.

Преимуществами герметизированных гелевых аккумуляторов являются: низкий саморазряд; возможность эксплуатации практически в любом положении; при разрушении корпуса электролит не вытекает; можно использовать непосредственно в производственных и жилых помещениях с естественной вентиляцией. Сейчас гелевые батареи широко используются в альтернативной энергетике, в домашних мощных АФЭУ, а также электротранспорте.

Из анализа технических характеристик, преимуществ и недостатков рассмотренных аккумуляторных батарей следует, что наиболее оптимальными для использования в автономных фотоэлектрических энергетических установках небольшой мощности являются никель-кадмиевые аккумуляторы (возможность возможности быстрого заряда). А в системах большой мощности – гелевые, из-за высокой емкости и меньшей стоимости. Литий ионные и литий полимерные аккумуляторы не могут быть использованы в автономных фотоэлектрических энергетических установках из-за высокой стоимости и малой распространенности в автономных системах электроснабжения [19].

1.3 Энергопреобразующие устройства установок с фотоэлектрическими преобразователями солнечной энергии

Контроллер заряда-разряда АБ, элемент в АФЭУ, который выполняет функции обеспечения эффективной работы солнечной батареи, регулирования тока заряда и разряда АБ (предохраняя от глубокого разряда и перезаряда, продлевая тем самым срок службы).

В настоящее время существует несколько типов контроллеров – с широтно-импульсной модуляцией тока заряда (ШИМ) и контроллеры (с ШИМ) с функцией экстремального регулирования мощности СБ. Основным недостатком ШИМ

контроллеров является то, что для заряда аккумуляторной батареи необходимо, чтобы напряжение СБ соответствовало напряжению АБ, иначе энергия фотоэлектрических преобразователей будет недоиспользоваться. То есть, для заряда 12 В аккумулятора нужна солнечная батарея с 36 солнечными элементами, соединенными последовательно. Для увеличения мощности таких цепочек может быть несколько, соединенных параллельно.

Контроллеры с ЭРМ СБ технически сложнее чем обычные ШИМ контроллеры, но до 30% эффективнее. Ассортимент контроллеров на современном рынке велик, они отличаются входными и выходными параметрами, совместимостью с различными типами аккумуляторных батарей. Основное отличие — это способ регулирования максимума мощности солнечной батареи и повышение за счет этого энергетической эффективности СБ.

Известны контроллеры заряда-разряда аккумуляторных батарей с реализацией функции экстремального регулирования мощности солнечных батарей фирм США, Германии, Китая и Канады: OutbackFlexMax [20-22], Morningstar [22-24], EPSolarTracer [25-27], StecaSolarix [28-30], ProsolarSunStar [31-33], Xantrex XW-MPPT60-150 [20, 34] и другие. Они представлены на Российском рынке, однако детально принципы построения и схемотехнические решения, как правило, не раскрываются.

Контроллер заряда EPSolarTracer (Китай) рассчитан для работы в фотоэлектрических системах малой и средней мощности при токе заряда 10/20/40 А и номинальном напряжении аккумуляторных батарей 12 и 24В (при изменении настроек контроллера возможно подключение аккумуляторных батарей как 12 В так и 24 В). Устройство осуществляет слежение за точкой максимума мощности СБ методом итераций вокруг текущей рабочей точки (Perturb & Observe). Максимальное входное напряжение 100В. Энергетическая эффективность 97% [22, 35].

В контроллере заряда фирмы StecaSolarix (Германия) слежение за точкой максимума мощности осуществляется методом итераций вокруг текущей рабочей точки. Данный контроллер позволяет совмещать фотоэлектрические модули с

напряжением оптимальной рабочей точки, при температуре окружающей среды +25 °С, равным 36 В и номинальном напряжении аккумуляторных батарей 12 и 24 В. Энергетическая эффективность ЭРМ 97% [22, 28, 29].

Контроллер заряда фирмы ProsolarSunStar (Китай) (рисунок 1.6 а) имеет несколько режимов регулирования напряжения фотоэлектрических модулей: метод итераций вокруг текущей рабочей точки; работа в найденной во время начального сканирования точке (Scan & Hold); работа при напряжении, составляющем определенную долю от напряжения холостого хода (%Voc); работа при определенном входном напряжении (HIV). Возможно использование аккумуляторных батарей 12, 24, 36, и 48 В. Энергетическая эффективность поиска экстремума мощности 97,5 % [22, 26, 27, 35].

Контроллер заряда фирмы Outback (США) (рисунок 1.6 б) осуществляет регулирование напряжения фотоэлектрических модулей двумя методами: метод итерации вокруг текущей рабочей точки; работа при напряжении, составляющем определенную долю от напряжения холостого хода.



а



б

Рисунок 1.6 – Контроллеры заряда:

а - ProsolarSunStar; б - Outback

Устройство совместимо с аккумуляторными батареями, номинальное напряжение которых 12, 24, 36, 48 и 60 В. Максимальное входное напряжение

150 В, поэтому они подходят для большинства аморфных модулей, которые, как правило, имеют напряжение холостого хода около 110 В. Энергетическая эффективность поиска экстремума мощности 97,5 % [20 - 22].

В контроллере заряда фирмы Xantrex (Канада) слежение за точкой максимума осуществляется методом итераций вокруг текущей рабочей точки. Также реализован режим работы при напряжении, составляющем определенную долю от напряжения холостого хода. Контроллер может работать с аккумуляторными батареями, номинальное напряжение которых 12, 24, 36, 48 и 60 В. Осуществляет заряд АБ с номинальным напряжением меньше, чем у солнечной батареи. Контроллер рассчитан на максимальное входное напряжение 150 В. Энергетическая эффективность поиска экстремума мощности 97,5 % [22, 34].

В таблице 1.1 приведены характеристики некоторых моделей контроллеров с ЭРМ СБ.

Таблица 1.1 – Параметры и характеристики контроллеров с ЭРМ СБ

Модель Параметры	EPSolarTracer MPPT		StecaSolarix	ProsolarSunStar MPPT			OutbackFlex Max		Xantrex
	2210/ 2215	4210/ 4215	MPPT 2010	SS- 80C	SS-40 CX	SS-80 CX	FM- 60	FM- 80	XW MPPT
Максимальный ток заряда АБ, А	20	40	20	80	40	80	60	80	60
Диапазон ЭРМ, В	12-100/12-150		17-100	16-112	16-192		12-140		12-140
Максимальное напряжение, В	100/150		100	140	240		150		150
Напряжение АБ, В	12/24		12/24	12/24/36/48			12/24/36/48/60		12/24/36/48/60
Энергетическая эффективность поиска экстремума, %	97		97	97,5			97,5		97,5
Стадий заряда	4		4	4			5		5
Коммуникационные возможности	нет		нет	RJ45-USB5			нет		XanBus
Алгоритм ЭРМ	P&O		P&O	P&O, S&H,%Voc, HIV			P&O, %Voc		P&O, %Voc

В России до недавнего времени разработкой контроллеров с функцией ЭРМ СБ для наземных энергетических установок практически никто не занимался. Известны работы Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по созданию автономных фотоэлектрических энергетических установок с высоким коэффициентом преобразования падающей солнечной энергии. Также есть информация о российской разработке солнечного MPPT-контроллера «ЕСО Энергия MPPT.PRO» (компания МикроАРТ) (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Контроллер «ЕСО Энергия MPPT.PRO»

Допустимое напряжение на входе контроллера до 200 В, что позволяет создать массив из трех солнечных панелей, подключенных последовательно с номиналом 24 В (напряжение открытой цепи каждой из них (без нагрузки) может достигать 45 В). Данный контроллер работает с аккумуляторными батареями, номинальное напряжение которых 12, 24, 36, 48 и 96 В. Энергетическая эффективность поиска экстремума мощности 97 %. КПД при полной нагрузке 95-97%.

1.4 Способы повышения энергетической эффективности установок с фотоэлектрическими преобразователями солнечной энергии

Повысить коэффициент преобразования падающей солнечной энергии АФЭУ до максимально возможного уровня позволяет одновременная реализация следующих системных способов:

- реализация режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей (отбор мощности в оптимальной рабочей точке вольт-амперной характеристики солнечной батареи);
- непрерывное автоматическое слежение СБ за Солнцем;
- оптимизация конструкции солнечной батареи с целью достижения минимального нагрева фотоэлементов, а также применение концентраторов.

Фактором, значительно уменьшающим количество энергии, является недоиспользование генерирующих возможностей солнечных батарей. Суммарная энергетическая эффективность большинства фотоэлектрических энергетических установок не превышает 5 -10%.

Реализация режима экстремального регулирования мощности СБ целесообразна для энергетических установок как в системах с непрерывным автоматическим слежением за Солнцем, так и в системах с неподвижными солнечными батареями (например, на крышах домов). ЭРМ может с успехом применяться для СБ любой мощности. Разброс параметров солнечных батарей от разных производителей также не имеет особого значения, поскольку поиск оптимума производится автоматически.

Эффект применения экстремального регулирования зависит от диапазона изменения температуры панелей солнечных батарей. При осуществлении непрерывного регулирования напряжения СБ в оптимальной рабочей точке использование солнечной батареи по мощности увеличивается до 30%.

Непрерывное автоматическое слежение СБ за Солнцем также позволяет значительно повысить энергетическую эффективность автономных фотоэлектрических энергетических установок (не менее чем на 25-30%).

Однако техническая реализация систем непрерывного автоматического слежения за Солнцем достаточно сложна, так как должна содержать кроме различных механических устройств и приспособлений электрические приводы вертикального и горизонтального вращения с редукторами, блоки управления и фотоэлектрические датчики.

В настоящее время производством фотоэлектрических энергоустановок со слежением за Солнцем занимается ряд известных российских и зарубежных фирм: ФТИ РАН им. А.Ф. Йоффе, НПО Астрофизика, МЭИ, Селтек (Украина), DITRAS (Украина), Sunpower (США), KonzaPortableSolarTrackers (США), Gintech (Китай), CanadianSolar (Канада), Motech (Тайвань), FirstSolar (США), YingliGreenEnergy (Китай), Titantracker (Испания), SUNPOWERT20 TRACKER (США), MerlinPowerSystems (США), и другие.

На рисунке 1.8 представлены фотографии энергетических установок фирмы Селтек. Данная конструкция позволяет размещать солнечные батареи площадью до 6 м². В системе слежения используются электродвигатели, контроллер и датчики наведения СБ на Солнце. Наведение системы осуществляется с точность до 1 градуса.



Рисунок 1.8 – Энергетические установки фирмы Селтек

Небольшая распространенность систем непрерывного автоматического слежения панелей за Солнцем объясняется тем, что во многих случаях СБ располагаются на крышах домов. В случае расположения ФЭП на открытых

площадках возникает вопрос целесообразности и экономической выгоды, так как техническая реализация сложна и не определены области рационального использования систем непрерывного автоматического слежения в зависимости от уровня выходной мощности или площади солнечной батареи. Реализация таких систем технически затруднена и, зачастую, экономически нецелесообразна.

В некоторых фотоэлектрических энергетических установках с автоматическим наведением СБ на Солнце используют солнечную батарею совместно с линзами Френеля. Это составная линза, которая состоит из отдельных примыкающих друг к другу концентрических колец небольшой толщины, которые в сечении имеют форму призм специального профиля (рисунок 1.9). Линзы Френеля делятся на кольцевые и поясные. Кольцевые – направляют световой поток в одном направлении. Лучи от точечного источника, помещенного в фокусе линзы, после преломления в кольцах выходят практически параллельным пучком. Поясные линзы посылают свет от источника по всем направлениям в определенной плоскости. Диаметр линзы может составлять от 10—20 см до нескольких метров.

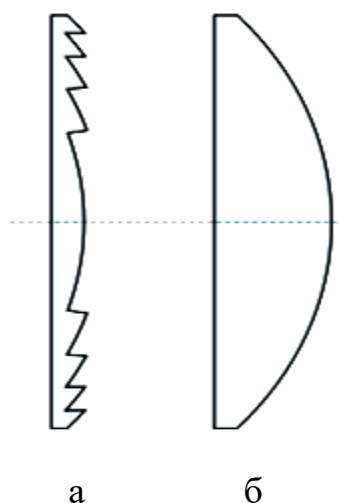


Рисунок 1.9 – Поперечное сечение линзы Френеля (а) и обычной линзы (б)

Применение линз Френеля в АФЭУ позволяет увеличить световой поток, приходящийся на единицу площади фотоэлектрических преобразователей, что повышает энергетическую эффективность установки в целом. Однако, вследствие применения линз, увеличивается температура ФЭП и скорость их деградации.

Также технология монтажа фотоэлектрической установки требует больших трудозатрат.

Еще одним методом повышения энергетической эффективности является оптимизация конструкции солнечной батареи с целью достижения минимального нагрева фотоэлементов, так как с повышением температуры эффективность работы СБ снижается. Информации о работах по исследованию эффективности конкретных мер и устройств принудительного охлаждения ФЭП практически нет.

Выводы по главе 1

1. Автономные фотоэлектрические энергетические установки предназначены для работы как самостоятельно, так и совместно с ветрогенератором или дизельгенератором, в зависимости от места расположения и условий эксплуатации системы. Структура АФЭУ включает в себя солнечные батареи, аккумуляторные батареи, контроллер заряда АБ и инвертор тока.

2. Наиболее оптимальными для использования в АФЭУ небольшой мощности являются никель-кадмиевые аккумуляторы, благодаря возможности быстрого заряда, а в системах средней и большой мощности – гелевые, из-за высокой емкости и меньшей стоимости.

3. Фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей имеют нестабильные вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики, изменяющиеся в больших диапазонах. Для повышения энергетической эффективности АФЭУ необходимо применение контроллеров с системой экстремального регулирования мощности солнечных батарей.

4. Реализация системы непрерывного автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем технически затруднительна и экономически невыгодна, поэтому целесообразно применение данных систем в возимых и мобильных фотоэлектрических энергетических установках специального назначения, задачей которых является максимальная энергетическая эффективность при малых габаритах солнечных батарей.

5. Известные методы расчета структуры и параметров автономных фотоэлектрических энергетических установок базируются на данных, представленных в интернет магазинах фирм производителей АФЭУ, которые не рациональны и зачастую завышают расчетные значения параметров источников энергии – солнечных и аккумуляторных батарей.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В главе проведен обзор методов определения параметров и характеристик автономных фотоэлектрических энергетических установок, выявлены их основные особенности и недостатки.

Предложена методика проектирования АФЭУ, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции, позволяющая в процессе проектирования оптимизировать структуру и технические параметры энергетической установки.

Проведен сравнительный анализ энергетической эффективности и параметров автономных фотоэлектрических энергетических установок различных структур.

2.1 Методы определения параметров и характеристик автономных фотоэлектрических энергетических установок

В настоящее время известны различные способы и методы определения параметров и характеристик фотоэлектрических установок, позволяющие с той или иной степенью точности рассчитать требуемые параметры ее узлов для заданных условий эксплуатации. Они различаются применяемым математическим аппаратом, заложенными в расчет характеристиками составных частей системы, разным временным промежутком, за который используются данные о климатических условиях.

Интервал времени, для которого строится климатическая характеристика, варьируется от одного месяца [36] до нескольких часов [37]. При этом используются либо средние многолетние характеристики типичного дня месяца [36], либо временные ряды исходных данных, включающие температуру воздуха, солнечную радиацию и скорость ветра для каждого интервала в пределах всего

расчетного периода [37]. Использование точных почасовых данных позволяет учесть локальные особенности климата, приводящие к устойчивой асимметрии в суточном ходе метеоданных. Такие точные климатические характеристики регистрируются крайне ограниченным числом метеостанций, в результате чего непосредственное использование подобных расчетных методов может быть затруднительным, так как возможностью моделирования необходимых исходных данных по интегральным месячным характеристикам они зачастую не обладают [37].

Компьютерные программы расчета фотоэлектрических установок можно разделить на две основные группы – проектирующие (расчетные программы) и моделирующие программы. Эти группы различаются как по исходным данным, так и по выходным результатам. Проектирующие программы позволяют за один расчетный цикл определить параметры АФЭУ для заданной нагрузки. Для моделирующих программ параметры системы должны быть заданы. Базовый алгоритм моделирующих - заключается в последовательном рассмотрении баланса энергии на каждом шаге моделирования и фиксации основных параметров работы системы (энергия, выработанная СБ и потребляемая нагрузкой, избыток либо недостаток энергии и т.п.).

Программы, относящиеся к классу проектирующих алгоритмов, должны не только моделировать распределение энергетических потоков в системе, но и определять состав энергоустановки, исходя из заданного перечня компонентов. Характерной чертой данных программ является то, что параметры АФЭУ определяются без учета энергобаланса на полном годовом или, в частном случае, сезонном цикле работы установки. Часто уравнение энергобаланса, включающее как аккумуляторную, так и солнечную батареи, вообще не рассматривается. Солнечная батарея должна обеспечить работу нагрузки в течение месяца с наихудшим соотношением инсоляции и энергопотребления [38, 39]. В результате, подобные алгоритмы дают минимум информации о возможных параметрах АФЭУ (значение пиковой мощности СБ и емкости АБ). Найденная пара значений соответствует максимальной реально необходимой мощности СБ и,

соответственно, минимальной из возможных емкостей аккумулятора. При таких параметрах системы солнечная батарея в течение года будет производить избыточную энергию. В то же время, можно себе представить фотоэлектрическую станцию, в которой СБ производит энергии ровно столько, сколько требуется для нагрузки с учетом возможных потерь в системе. Мощность такой СБ будет минимально возможной, а соответствующая емкость АБ - максимальной для данной системы. Параметры этого и других вариантов с промежуточными соотношениями мощности и емкости, существующие проектирующие программы определить не в состоянии.

Для расчета системы требуется определить и рассмотреть множество ее работоспособных вариантов. Для поиска этого множества используется метод перебора вариантов. Работоспособность очередного варианта проверяется с помощью моделирующих программ [40]. По результатам моделирования параметры системы корректируются, и расчетный цикл повторяется с новыми исходными данными до тех пор, пока не будут получены удовлетворительные результаты.

Известна методика расчета мощности автономных солнечных электростанций (АСЭ) [41], которая заключается в расчете выходной мощности автономной электростанции, емкости аккумуляторной батареи, мощности зарядного устройства, мощности основной шины; мощности солнечных батарей и автономных инверторов напряжения.

На первом этапе расчета необходимо составить список потребителей электроэнергии, их мощность и напряжение. Затем производится оценка времени, в течение которого используются электроприборы, и определяется ежедневная потребность в электроэнергии. Далее составляется таблица общего энергопотребления за сутки и график энергопотребления, на основе которого проводится расчет суммарной мощности энергопотребления нагрузкой и необходимой выходной мощности АСЭ по формуле:

$$P_{oc,i} = P_{n,i} / \eta_i,$$

где $P_{n,i}$ – мощность i -го потребителя; $P_{oc,i}$ – мощность i -го потребителя, пересчитанная на основную шину АСЭ; η_i – КПД i -го автономного инвертора напряжения.

На втором этапе проводится расчет емкости аккумуляторной батареи исходя из потребности электропитания нагрузки в ночное время суток по формуле:

$$C_H = \frac{100}{S_p} \frac{P_H}{U_H} \Delta t_{\text{нв}},$$

где P_H – номинальная мощность нагрузки; U_H – номинальное напряжение нагрузки; $\Delta t_{\text{нв}}$ – интервал ночного времени суток (в летнее время $\Delta t_{\text{нв}} = 10$ ч, зимой – $\Delta t_{\text{нв}} = 16$ ч); S_p – степень разряженности аккумуляторной батареи.

Третий этап заключается в расчете мощности зарядного устройства АСЭ. Производится выбор метода заряда аккумуляторной батареи (при постоянстве тока или постоянстве напряжения). Заряд при постоянстве тока производится значением от 0,2 до 0,3 емкости аккумулятора. Недостаток такого способа заряда – необходимость постоянного контроля и регулирования зарядного тока [41]. В заряде при постоянстве напряжения уровень заряженности аккумуляторной батареи определяет значение зарядного напряжения. Ток зарядного устройства в первый момент включения может достигать 40-50 А и более. Поэтому ЗУ должно снабжаться схемными решениями, ограничивающими максимальный ток заряда [41].

Для ускоренного заряда аккумуляторных батарей применяется заряд в два этапа – при постоянном токе, а затем при постоянном напряжении. Метод позволяет значительно сократить время заряда АБ.

Далее следует произвести расчет мощности и количества солнечных батарей необходимых для заряда и электропитания АСЭ. Основное внимание уделяется погодным условиям местности, в которой предполагается эксплуатация АСЭ. Учитывается количество солнечной энергии, на которое можно рассчитывать, а

также среднемесячные значения солнечной радиации при наихудших погодных условиях.

В завершение производится выбор инвертора напряжения на основе полученных значений расчета мощности нагрузки в системе.

Также известен реверсивно-балансовый метод определения параметров АФЭУ [42]. Основное его отличие в том, что определяются параметры альтернативных вариантов фотоэлектрических станций, которые могут быть сведены к нескольким наиболее «выгодным» вариантам путем оптимизирующих расчетов. Данный метод позволяет исследовать закономерности построения фотоэлектрических установок, оценить влияние параметров и климатических данных в их взаимосвязи, на эксплуатационные характеристики.

Известна статья [43], в которой описана имитационная модель автономной системы электропитания на основе СБ, АБ и нагрузки. Управление состояниями солнечной и аккумуляторной батареей обеспечивается контроллером СБ. Функционирование модели соответствует логике функционирования АФЭУ в реальном времени. На рисунке 2.1 приведена модель АФЭУ и изображены параметры системы, которые могут задаваться пользователем.

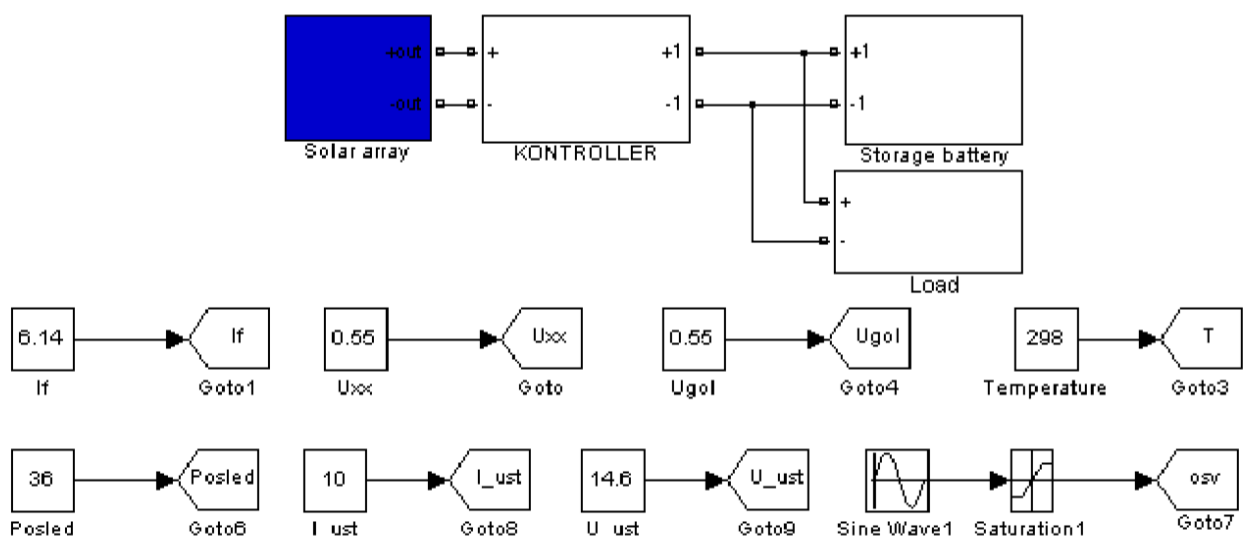


Рисунок 2.1 – Имитационная модель автономной фотоэлектрической установки

По заявлению авторов, данная модель адекватно отображает работу солнечной батареи, аккумуляторной батареи, контроллера солнечной батареи и нагрузки, что позволяет использовать данную модель при проектировании АФЭУ.

В основном методики расчета параметров автономных фотоэлектрических энергетических установок заключаются в согласование графиков генерации и потребления энергии. Наличие в системе возобновляемых источников энергии приводит к тому, что полное согласование этих графиков в большинстве случаев невозможно либо невыгодно, так как работа возобновляемых источников зависит от климатических факторов. Как правило, в методиках расчет проводится исходя из среднегодовой или среднемесячной оценки погодных условий, а иногда учитывая лишь продолжительности ночного времени суток. Во всех этих случаях основным недостатком является то, что не учитываются ситуации, в которых, не смотря на высокое значение среднемесячной инсоляции, имеется продолжительный период времени (несколько дней) без солнца. В таких случаях системы, рассчитанные на среднемесячные или среднегодовые климатические показатели, не будут обеспечивать бесперебойное электропитание потребителя. Возможна и обратная ситуация, когда при низком уровне среднемесячной инсоляции количество последовательных дней без солнца будет меньше, и при расчете система окажется с избыточно заложенной мощностью.

2.2 Методика проектирования автономных энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции

Задача проектирования автономных энергетических установок состоит в определении их требуемой мощности, выборе типа и параметров солнечных и аккумуляторных батарей, а также определении параметров энергопреобразующих устройств. Условием энергобаланса является равенство нулю разрядной емкости АБ в конце расчетного периода, т.е. энергия АБ, расходуемая при превышениях

мощности нагрузки над мощностью СБ, в конце расчетного периода должна быть полностью восстановлена.

Основными необходимыми данными для расчета мощности АФЭУ являются параметры графика энергопотребления, который формируется на основе следующих действий [44]:

- определение потребителей электроэнергии и их мощности;
- определение типа потребителя (переменного или постоянного напряжения);
- оценка времени и продолжительности работы данных потребителей в течение суток.

В качестве примера на рисунке 2.2 представлен произвольно составленный типовой график энергопотребления помещения жилого или производственного назначения в летний период времени года (где t_1 – t_2 – продолжительность светового дня).

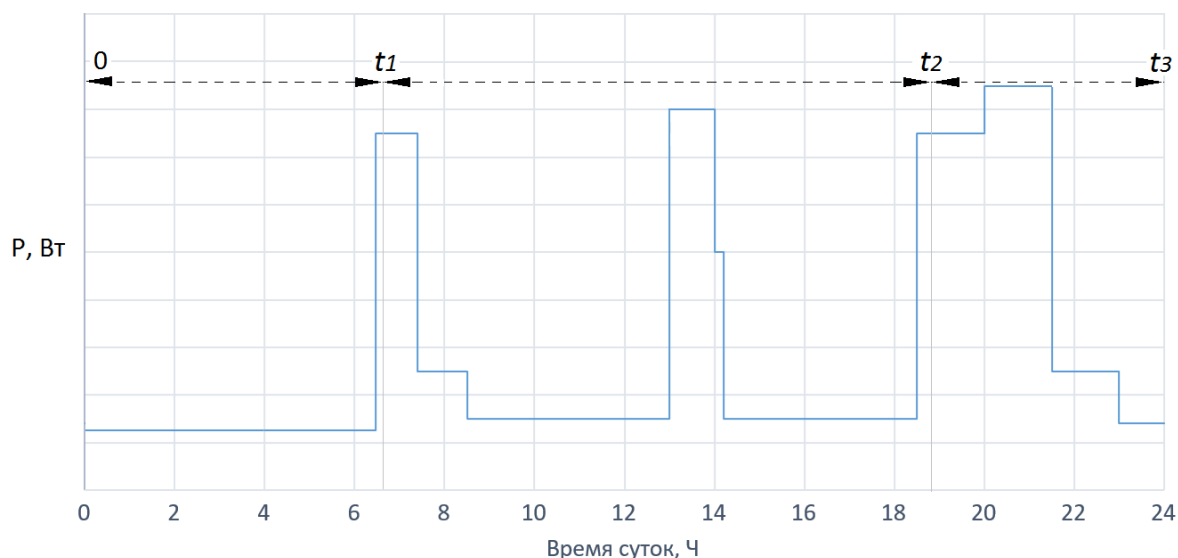


Рисунок 2.2 – Типовой график энергопотребления помещения жилого или производственного назначения

При составлении графика важно оптимизировать нагрузку и, по возможности, уменьшить потребление энергии. При наличии потребителей энергии, которые нельзя исключить, необходимо рассмотреть вариант, при котором они будут включены только в периоды с достаточной освещенностью

солнечных батарей, а также распределить подключение потребителей во времени так, чтобы выходная мощность АФЭУ стремилась к минимуму.

Потребляемая нагрузкой суточная энергия рассчитывается по формуле:

$$W_{24} = \int_0^{24} P_n dt, \quad (2.1)$$

где P_n - потребляемая нагрузкой суточная мощность.

Основными условиями по выбору аккумуляторов являются:

- стойкость к циклическому режиму работы;
- способность выдерживать глубокий разряд;
- низкий саморазряд;
- стойкость к нарушению условий заряда и разряда;
- долговечность;
- простота в обслуживании.

Количество, емкость и номинальное напряжение аккумуляторных батарей определяется на основе полученного расчетного графика энергопотребления. В большинстве случаев рекомендуется использовать герметичные необслуживаемые гелевые АБ общего назначения, которые обладают наиболее оптимальными эксплуатационно-экономическими параметрами [44, 45].

Эксплуатация аккумуляторов при глубоком разряде приводит к необходимости их более частой замены и к удорожанию системы. Глубину разряда аккумуляторов в солнечных системах стремятся ограничить на уровне 30...40%, что достигается отключением нагрузки (снижением мощности) или использованием аккумуляторов большей емкости [46].

Номинальное напряжение АБ может составлять 12, 24, 48 В, оно влияет на параметры инвертора и контроллера заряда. Фотоэлектрические энергетические установки, производящие менее 1000-1500 Вт·ч в день, лучше всего сочетаются с напряжением в 12 В, производящие 1000-3000 Вт·ч - 24 В, а установки, производящие более 3000 Вт·ч в день, следует использовать 48 В или выше [44].

Емкость аккумуляторных батарей для обеспечения энергобаланса энергетической установки целесообразно выбирать из расчета количества последовательных дней без солнца. На рисунке 2.3 приведен график, показывающий уровень приходящей солнечной радиации в городе Томск за июль 2015 г., составленный на основе данных интернет ресурса с календарем погоды. Из анализа графика следует, что количество последовательных дней без солнца не превышает трех. Аналогичный график уровня инсоляции можно получить для любой необходимой местности.

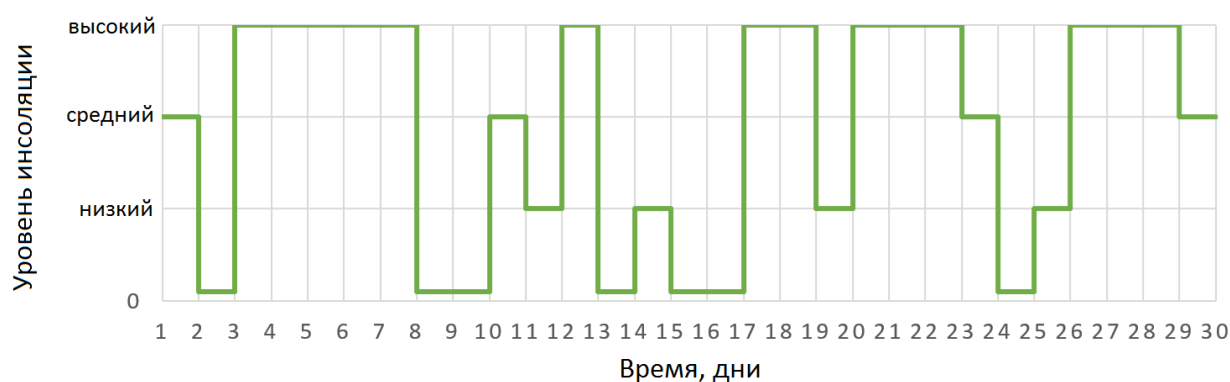


Рисунок 2.3 – График уровня инсоляции в городе Томск за июль 2015 г.

Таким образом, емкость аккумуляторной батареи рассчитывается по формуле:

$$C_{AB} = \frac{W_{24} \cdot N}{U_{AB} \cdot \eta_p}, \quad (2.2)$$

где C_{AB} – необходимая емкость аккумуляторной батареи (А·ч);

W_{24} – потребляемая нагрузкой суточная энергия (Вт);

N – количество последовательных дней без заряда АБ от СБ;

U_{AB} – номинальное напряжение аккумуляторной батареи (В);

η_p – допустимая глубина разряда (%). Значение из паспортных данных на аккумуляторную батарею.

Анализ графиков уровня инсоляции в различных регионах РФ показывает, что в южных областях страны количество последовательных дней без солнца, как правило, не превышает двух, и общий уровень инсоляции близок к максимальной отметке. Для примера на рисунке 2.4 показан график уровня инсоляции для полуострова Крым.



Рисунок 2.4 – График уровня инсоляции полуострова Крым за июль 2015 г.

В течение светового дня солнечные батареи заряжают АБ и снабжают энергией потребителей. Энергия от СБ, требуемая для питания нагрузки в течение периода $(k+m)$, рассчитывается по формуле:

$$W_{CB(k+m)} = m \cdot 1,2 \int_0^{24} P_n dt + k \cdot 1,2 \int_0^{t_1} P_{n(\text{тень})} dt + k \int_{t_1}^{t_2} P_{n(\text{свет})} dt + k \cdot 1,2 \int_{t_2}^{t_3} P_{n(\text{тень})} dt, \quad (2.3)$$

где k - дни с достаточной (средней) освещенностью;

m - дни без солнца;

1,2 - коэффициент, учитывающий КПД АБ.

Количество дней k и m определяется по графику инсоляции конкретной местности.

Требуемая суточная энергия от СБ рассчитывается по формуле:

$$W_{CB(24)} = \frac{W_{CB(k+m)}}{k}, \quad (2.4)$$

Для определения требуемой площади фотоэлектрических панелей необходимо знать:

- номинальную мощность выбранных фотоэлектрических модулей;
- планируемый период использования АФЭУ;
- график инсоляции конкретной местности;
- ориентацию фотоэлектрических модулей относительно солнца (неподвижная установка ФЭП под заданным углом, наличие системы автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем);
- наличие системы экстремального регулирования мощности СБ.

В современных АФЭУ преимущественно используются фотоэлектрические модули номинальной мощностью 120-180 Вт/м² [47]. Количество вырабатываемой электроэнергии солнечной батареей напрямую зависит от периода (времени года) использования АФЭУ и погодных условий. Значение графика инсоляции для той или иной местности можно найти в специальных изданиях на карте инсоляции, а также в таблицах прихода солнечной энергии на интернет-ресурсах.

Повысить энергетическую эффективность солнечной батареи возможно следующими основными способами [1]:

- реализацией режима непрерывного автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем;
- реализацией режима отбора мощности в оптимальной рабочей точке вольт-амперной характеристики СБ (реализацией режима экстремального регулирования мощности (ЭРМ) солнечных батарей).

Энергетическая эффективность с применением двухосевой системы автоматического слежения за Солнцем фотоэлектрических панелей составляет до 50%. Но такие системы имеют сложную конструкцию и достаточно дорогие, из-за чего не всегда оправдывают себя.

Эффект от реализации режима ЭРМ СБ зависит от диапазона изменения температуры фотоэлектрических панелей. Анализ показывает, что в сравнении с системами с параллельным соединением СБ и АБ (рабочее напряжение СБ равно напряжению АБ), энергетическая эффективность реализации режима экстремального регулирования мощности СБ может достигать 30% [48].

Основываясь на требуемых исходных данных, необходимая площадь солнечной батареи может быть рассчитана по формуле:

$$S_{CB} = \frac{W_{CB(24)}}{W_{CB.m^2(24)}}, \quad (2.5)$$

где $W_{CB.m^2(24)}$ – суточная энергия, вырабатываемая 1 м² солнечной батареи, которая рассчитывается по формуле:

$$W_{CB.m^2(24)} = \frac{P_{CB.m^2} \cdot (t_2 - t_1) \cdot K_{ЭРМ}}{K_{уст}}, \quad (2.6)$$

где $P_{CB.m^2}$ – мощность одного м² СБ (при нормальных условиях) указанная в технических параметрах эксплуатации;

$t_1 - t_2$ – продолжительность светового дня;

$K_{ЭРМ}$ – коэффициент увеличения энергетической эффективности при экстремальном регулировании мощности СБ относительно параллельно-последовательного соединения СБ и АБ (ориентировочно равен 1,3);

$K_{уст}$ – поправочный коэффициент установки СБ в пространстве.

Поправочный коэффициент установки СБ в пространстве подтвержден на моделях и может принимать разные значения:

- при наличии двухосевой системы слежения за Солнцем значение коэффициента принимается равным единице;
- при установке СБ под углом, равным широте местоположения и ориентированной на Юг, значение – 1,25;
- при отсутствии двухосевой системы слежения за Солнцем и установкой СБ в положении, близком к горизонтальному, значение коэффициента принимается 1,5.

Более точные значения коэффициентов можно получить на имитационной модели АФЭУ с учетом температуры, освещенности и других условий.

Контроллер заряда АБ и регулирования мощности СБ является важным элементом АФЭУ, так как обеспечивает эффективную работу солнечной батареи,

регулирует ток заряда и разряда АБ, предохраняя ее от глубокого разряда и перезаряда, продлевая тем самым срок службы.

При выборе контроллеров необходимо учитывать рабочие значения напряжений СБ и АБ, а также значение номинального тока. Контроллер с ШИМ выбирается по току короткого замыкания СБ с запасом 20-25%. Контроллер с ЭРМ СБ выбирается в зависимости от мощности системы с учетом напряжения аккумуляторных батарей в разряженном состоянии. Кроме того, быстродействие контроллера с ЭРМ должно обеспечивать устойчивый поиск точки экстремума мощности при дрейфе ВАХ и ВВХ солнечной батареи.

Для преобразования постоянного тока источников питания в переменный необходим инвертор. Для всех типов инверторов основной параметр - КПД (должен быть более 90%) [46].

Выходное напряжение инверторов составляет 220 В (50/60 Гц), а в инверторах мощностью выше 10 кВт - 380 В. Входное напряжение подбирается из ряда 12, 24, 48 В. К форме выходного сигнала автономных инверторов предъявляются менее жесткие требования. В ряде случаев (зависит от нагрузки) возможно применение инверторов с трапециевидным выходным сигналом. Их стоимость в несколько раз ниже инверторов с синусоидальным выходным сигналом [46].

К инвертору автономной фотоэлектрической энергетической установки предъявляются следующие требования [46]:

- способность выдерживать перегрузки (как кратковременные, так и длительные);
- низкие потери при малых нагрузках и на холостом ходу;
- стабилизация выходного напряжения;
- низкий коэффициент гармоник;
- высокий КПД.

При выборе инвертора необходимо учитывать всю суммарную мощность потребления электрических приборов, подключаемых к инвертору, и увеличить это значение на 40%. Выбранный на эту мощность преобразователь позволит

обеспечивать включение таких электроприборов, как компрессорный холодильник, насосы и другие, с пусковыми мощностями, превышающими паспортные значения.

Таким образом, предлагаемая методика проектирования автономных энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности, заключается в поэтапном решении следующих задач:

- определение требуемой мощности проектируемой энергетической установки;
- выбор типа и параметров аккумуляторных батарей;
- определение площади и параметров солнечных батарей;
- выборе параметров контроллера заряда АБ и регулирования мощности СБ;
- выборе параметров инвертора.

2.3 Сравнительный анализ энергетической эффективности и параметров автономных фотоэлектрических энергетических установок

Разработанная методика проектирования АФЭУ позволяет определять оптимальные параметры, а также, в зависимости от условий эксплуатации и конкретных требований конечного потребителя, варьировать состав системы. Методика позволяет проектировать фотоэлектрические установки в следующих конфигурациях:

1) при установке солнечных батарей АФЭУ, ориентированных на Юг под углом, равным широте местоположения и стабилизации напряжения СБ на заданном уровне (АФЭУ – ШМ);

2) при установке солнечных батарей АФЭУ, ориентированных на Юг под углом, равным широте местоположения с экстремальным шаговым регулятором мощности СБ (АФЭУ – ШМ ЭРМ);

3) при двухосевом слежении солнечных батарей за Солнцем и стабилизации напряжения СБ на заданном уровне (АФЭУ – ДО);

4) при двухосевом слежении СБ за Солнцем и ЭРМ мощности СБ (АФЭУ – ДО ЭРМ).

Для сравнительного анализа параметров и энергетической эффективности фотоэлектрических энергетических установок различных параметров и конфигурации по разработанной методике проведен расчет АФЭУ, предназначенной для электропитания жилого помещения в теплое время года, территориально расположенного на полуострове Крым. Для расчета использованы данные графика энергопотребления (рисунок 2.5) и график инсоляции (рисунок 2.6).

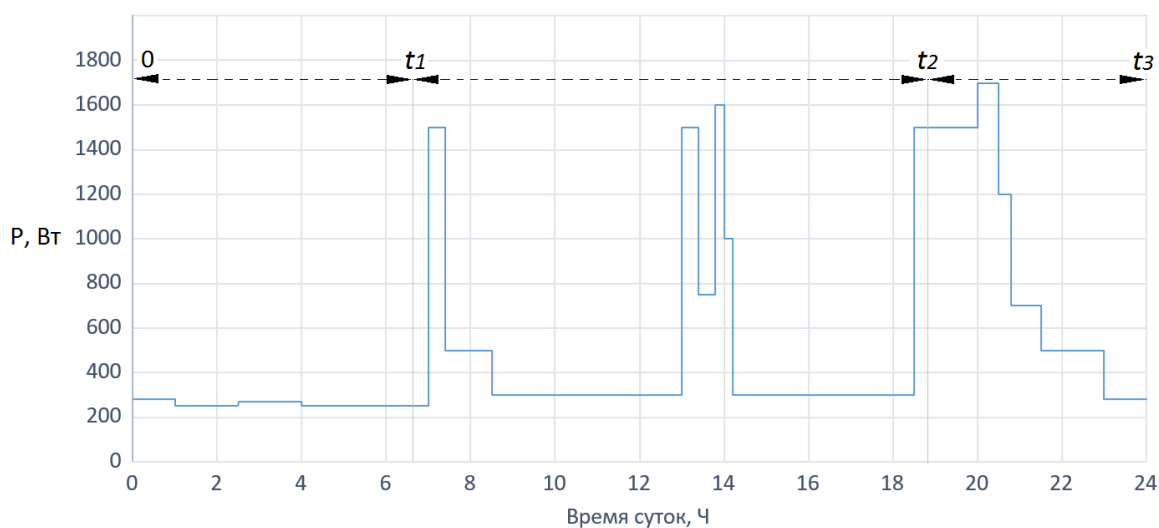


Рисунок 2.5 – График энергопотребления жилого помещения

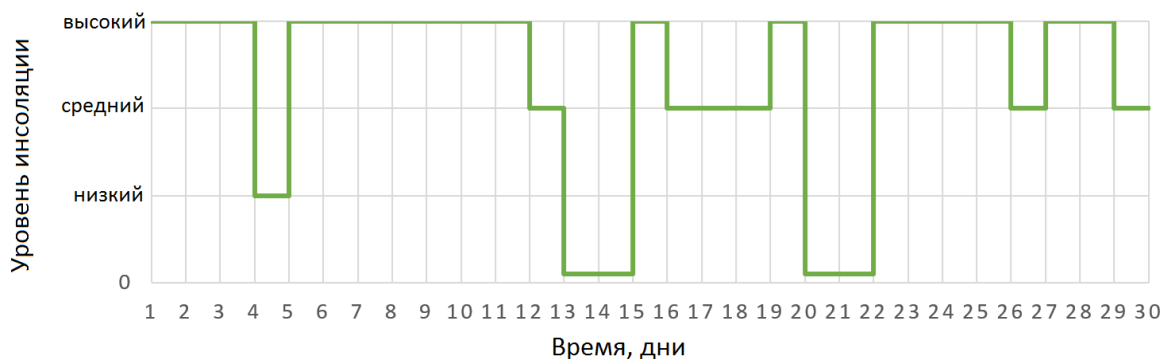


Рисунок 2.6 – График уровня инсоляции полуострова Крым за июль 2015 г.

Согласно методике, расчет потребляемой нагрузкой суточной энергии производится по формуле (2.1):

$$W_{24} = \int_0^{24} P_{\text{н}} dt \approx 5600 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)}.$$

Расчет емкости аккумуляторной батареи производится по формуле (2.2):

$$C_{AB} = \frac{W_{24} \cdot N}{U_{AB} \cdot \eta_p} = \frac{5600 \cdot 2}{48 \cdot 0,7} \approx 335 \text{ (А} \cdot \text{ч)}.$$

Исходя из полученных данных, целесообразно использование четырех последовательно соединенных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (12 В, 90 А·ч) общей номинальной емкостью не менее 360 А·ч и суммарным напряжением 48 В.

Энергия от СБ, необходимая для электроснабжения нагрузки в течение периода $(k+m)$, рассчитывается по формуле (2.3):

$$\begin{aligned} W_{CB(k+m)} &= m \cdot 1,2 \int_0^{24} P_{\text{н}} dt + k \cdot 1,2 \int_0^{t_1} P_{\text{н(тень)}} dt + k \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{н(свет)}} dt + k \cdot 1,2 \int_{t_2}^{t_3} P_{\text{н(тень)}} dt = \\ &= 2 \cdot 1,2 \cdot 5600 + 5 \cdot 1,2 \cdot 800 + 5 \cdot 2400 + 5 \cdot 1,2 \cdot 2400 = 44600 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)} \end{aligned}$$

Требуемая суточная энергия СБ рассчитывается по формуле (2.4):

$$W_{CB(24)} = \frac{W_{CB(k+m)}}{k} = \frac{44600}{5} = 8920 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)}.$$

Суммарная суточная энергия, генерируемая ФЭП, непосредственно зависит от структуры и условий эксплуатации СБ. Ниже приведены расчеты для каждого из вариантов структуры АФЭУ, результаты которых сведены в таблицу 2.1.

1) Структура АФЭУ – ШМ:

$$W_{CB.M^2(24)} = \frac{180 \cdot 10}{1,25} = 1440 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)}.$$

2) Структура АФЭУ – ШМ ЭРМ:

$$W_{CB.M^2(24)} = \frac{180 \cdot 10 \cdot 1,3}{1,25} = 1872 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)}.$$

3) Структура АФЭУ – ДО:

$$W_{CB, м^2(24)} = \frac{180 \cdot 10}{1} = 1800 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)}.$$

4) Структура АФЭУ – ДО ЭРМ:

$$W_{CB, м^2(24)} = \frac{180 \cdot 10 \cdot 1,3}{1} = 2\,340 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)}.$$

Необходимая площадь солнечной батареи рассчитывается по формуле (2.5):

$$1) S_{CB} = \frac{8\,920}{1\,440} \approx 6,2 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$2) S_{CB} = \frac{8\,920}{1\,872} \approx 4,8 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$3) S_{CB} = \frac{8\,920}{1\,800} \approx 4,95 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$4) S_{CB} = \frac{8\,920}{2\,340} \approx 3,8 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Для расчета количества солнечных батарей использованы фотоэлектрические преобразователи «НН-MONO180W» мощностью 180 Вт и площадью 1,3 м². Стоимость рассчитана, исходя из среднерыночной на комплектующие АФЭУ, и показывает ориентировочную цену конечной структуры фотоэлектрической установки.

Таблица 2.1 – Сводная таблица зависимости необходимой площади фотоэлектрических преобразователей от структуры АФЭУ

Структура АФЭУ	Площадь ФЭП, м ²	Необходимое количество панелей СБ, шт	Ориентировочная* стоимость конфигурации, руб
1) АФЭУ – ШМ	6,2	5	117 380
2) АФЭУ – ШМ ЭРМ	4,8	4	110 860
3) АФЭУ – ДО	4,95	4	183 500
4) АФЭУ – ДО ЭРМ	3,8	3	173 820
* Цена указана за отдельное оборудование, а не за систему в сборе (информация с сайта solnechnye.ru)			

Таким образом, после проведения сравнительного анализа энергетической эффективности и параметров АФЭУ выявлено, что выбранная структура установки оказывает большое влияние на требуемую площадь солнечных батарей для одного и того же графика энергопотребления. В вариантах структур с двухосевым слежением СБ за Солнцем и ЭРМ мощности СБ и структуре с установкой солнечных батарей, ориентированных на Юг под углом, равным широте местоположения и стабилизации напряжения СБ на заданном уровне, количество СБ может варьироваться от 3 до 5 штук для АФЭУ малой мощности. Эффект от применения системы ЭРМ солнечных батарей сопоставим с системой автоматического слежения СБ за Солнцем, но в разы дешевле, а также проще реализуем.

Выводы по главе 2

1. Известны различные способы и методы определения параметров и характеристик фотоэлектрических установок, позволяющие с той или иной степенью точности рассчитать требуемые параметры ее узлов, но зачастую они имеют заведомо избыточную мощность или рассчитываются, исходя из данных инсоляции, которые не дают точной круглогодичной картины в конкретной местности.

2. Разработана методика проектирования автономных энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности, позволяющая в процессе проектирования сравнивать и выбирать рациональный вариант структуры и технические параметры энергетической установки для заданных условий эксплуатации и графика энергопотребления.

3. Сравнительный анализ энергетической эффективности и параметров автономных фотоэлектрических энергетических установок показал, что эффект от применения системы экстремального регулирования мощности солнечных батарей сопоставим с эффектом от системы автоматического слежения СБ за Солнцем, но ЭРМ значительно проще реализуется.

4. Стоимостной сравнительный анализ структур автономных фотоэлектрических энергетических установок с установкой солнечных батарей, ориентированных на Юг под углом, равным широте местоположения и стабилизации напряжения СБ на заданном уровне, а также с двухосевым слежением СБ за Солнцем и ЭРМ мощности СБ показал, что наиболее рациональным и выгодным вариантом построения АФЭУ является структура с установкой солнечных батарей, ориентированных на Юг и ЭРМ.

ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

В главе рассмотрены преобразователи мощности солнечных батарей, применяемые в контроллерах заряда аккумуляторных батарей с экстремальным регулированием мощности СБ. Рассмотрены способы регулирования максимума мощности солнечных батарей и выявлен наиболее рациональный из них. Приведено описание разработанной имитационной модели автономной фотоэлектрической энергетической установки, проведен анализ характеристик систем экстремального шагового регулирования мощности солнечной батареи и определены их параметры.

3.1 Преобразователи мощности солнечных батарей

Одной из важнейших задач, возникающих при проектировании и создании преобразователей мощности (зарядных устройств) автономных фотоэлектрических энергетических установок, является согласование уровней напряжения источников энергии. Учитывая, что напряжение рабочей точки вольт-амперной характеристики соответствующей максимальной мощности нестабильно, преобразователь должен быть регулируемым. Необходимость обеспечения широкого диапазона регулирования напряжения СБ при поиске точки максимальной мощности существенно влияет на структуру построения контроллера заряда аккумуляторных батарей и усложняет определение его энергетических параметров, а также расчет электрорадиоэлементов силовой схемы [50].

Контроллеры заряда строятся на основе бестрансформаторных преобразователей постоянного напряжения, которые обеспечивают высокое значение КПД за счет малого количества силовых элементов. Однако эти схемы имеют ограниченный диапазон регулирования, что усложняет согласование уровней напряжения солнечной и аккумуляторной батарей. Согласование достигается путем последовательного или параллельного соединения

элементарных источников, составляющих АБ или СБ, что позволяет настроить уровни напряжения источников таким образом, чтобы диапазон регулирования преобразователя включал в себя точку максимальной мощности ВВХ с учетом ее возможного дрейфа. При этом не всегда удастся достичь приемлемых энергетических характеристик системы [50].

Распространенным вариантом КЗАБ на основе преобразователей постоянного напряжения является простейший понижающий преобразователь, представленный на рисунок 3.1, *а*. Преимуществом схемы является стабильный ток заряда аккумулятора, обеспечиваемый большой выходной индуктивностью, однако прерывистое импульсное потребление входного тока требует установки громоздкого *С*-фильтра. Регулировочная характеристика такого преобразователя, при условии непрерывности тока дросселя, описывается соотношением:

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\gamma}{1 + R_{L1}/R_H}, \quad (3.1)$$

где γ – относительная длительность открытого состояния транзистора; R_{L1} – активное сопротивление дросселя L_1 ; R_H – сопротивление нагрузки.

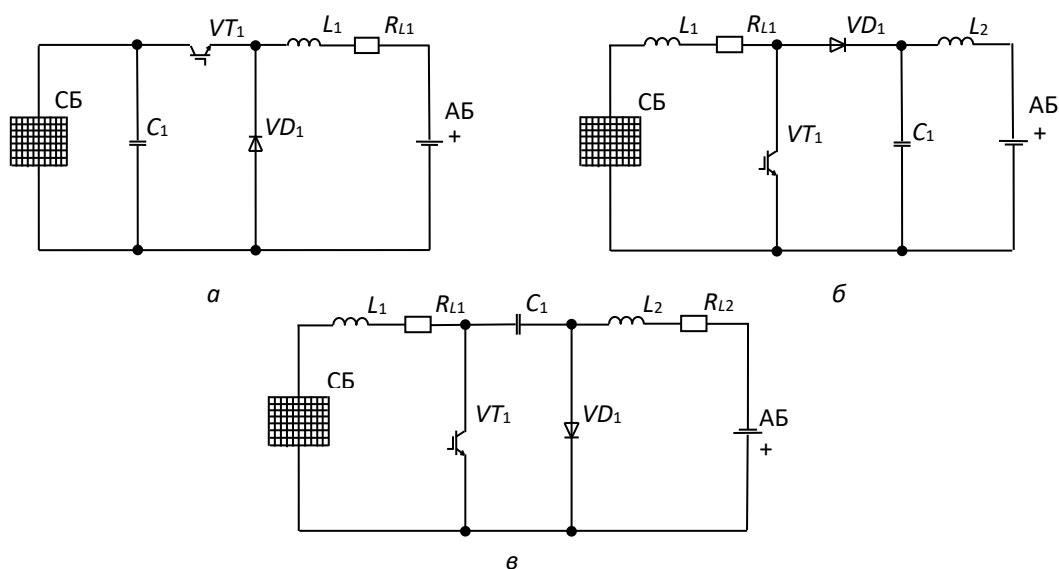


Рисунок 3.1 – Регулируемые преобразователи энергии солнечной батареи:

а – понижающий преобразователь; *б* – повышающий преобразователь;

в – преобразователь Кука

Регулировочная характеристика (3.1) соответствует работе преобразователя от источника ЭДС. При питании преобразователя от солнечной батареи, имеющей нелинейную ВАХ, и работе на аккумуляторную батарею, которая является нагрузкой с непостоянным сопротивлением, характеристики существенно изменятся. Используя выражение 3.1 и учитывая, что регулируемым параметром является напряжение СБ, получено выражение:

$$U_{СБ}^* = \frac{U_{СБ}}{U_{АБ}} = \frac{1 + R_{L1}/R_H}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot I_{ВЫХ}}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot \frac{I_{ВХ}}{\gamma}}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot \frac{I_{СБ}}{\gamma^2}.$$

В связи с существенной сложностью выражений, описывающих ВАХ реальной СБ, воспользуемся математической моделью СБ, предложенной в [51], где ВАХ задана тремя характерными точками: напряжением холостого хода $U_{ХХ}$, током короткого замыкания $I_{КЗ}$, оптимальными значениями тока I_0 и напряжения U_0 :

$$I_{СБ} = I_{КЗ} \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{КЗ}} \right) \frac{U_{ХХ} - U_{СБ}}{U_{ХХ} - U_0} \right), \quad (3.2)$$

используя которое, получим уравнение:

$$U_{СБ}^* = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}^*}{\gamma^2} \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{КЗ}} \right) \frac{U_{ХХ} - U_{СБ}}{U_{ХХ} - U_0} \right), \quad (3.3)$$

связывающее регулируемый параметр $U_{СБ}$ с относительной длительностью импульса управления γ . Сопротивление потерь в дросселе удобно выразить относительной величиной $R_{L1}^* = R_{L1} \cdot I_{КЗ} / U_{АБ}$.

Важным параметром, характеризующим энергетическую эффективность КЗАБ, является коэффициент использования СБ - K_p , определяемый соотношением фактически потребляемой мощностью от СБ и мощностью оптимальной точки ВАХ:

$$K_p = \frac{P_{СБ}}{P_{СБ_max}} = \frac{U_{СБ}}{U_0^*} \cdot \frac{I_{СБ}}{I_0}.$$

Другой рассматриваемый критерий энергетической эффективности – коэффициент полезного действия преобразователя (η), который при пренебрежении потерями в транзисторе VT_1 , т.е. при учете только потерь в дросселе L_1 , можно получить по выражению:

$$\eta = \frac{1}{U_{CB}^*} \cdot \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \frac{1}{U_{CB}^*} \cdot \frac{1}{\gamma}.$$

Таким образом, задавая ВАХ СБ с помощью выражения (3.2), можно определить зависимости энергетических параметров преобразователя от управляющего воздействия γ .

Целесообразным является определение энергетических характеристик КЗАБ в крайних точках его диапазона регулирования, т.е. при ВАХ, соответствующих крайним значениям напряжения U_0 . В результате проведенных исследований установлено, что для панели КСМ-160 максимальное значение напряжения оптимальной точки соответствует солнечной погоде и температуре -30°C , при этом ВАХ2 имеет параметры $U_{ХХ} = 52\text{ В}$, $I_{КЗ} = 4,8\text{ А}$, $U_{01} = 43,1\text{ В}$, $I_{01} = 4,3\text{ А}$. Минимальное значение напряжения оптимальной точки соответствует слабой освещенности панелей при температуре от $+60$ до $+70^\circ\text{C}$. ВАХ1 в этом случае имеет параметры $U_{ХХ} = 25,2\text{ В}$; $I_{КЗ} = 2,1\text{ А}$; $U_{02} = 21,8\text{ В}$; $I_{02} = 1,8\text{ А}$. Графически характеристики СБ представлены на рисунке 3.2.

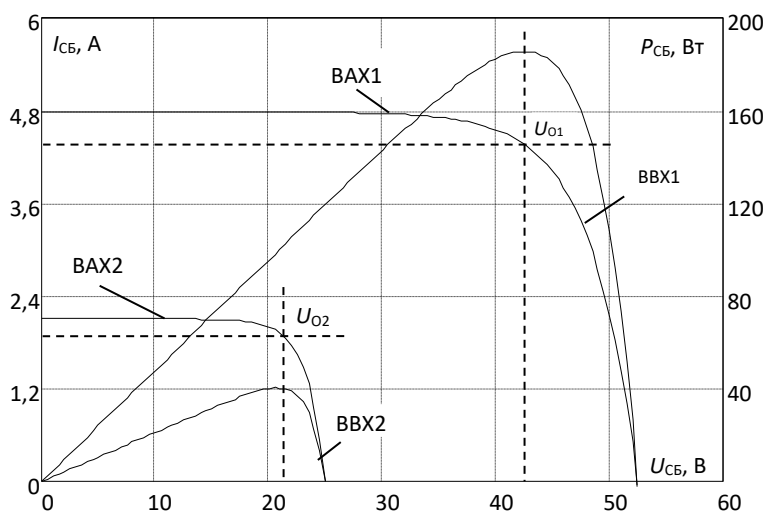


Рисунок 3.2 – Семейство ВАХ и ВВХ фотоэлектрических преобразователей КСМ-160

Характеристики понижающего преобразователя при работе на ВАХ (рисунок 3.2) при напряжении аккумулятора $U_{AB} = 24$ В и относительных потерях в дросселе $R_{L1}^* = 0,05$ показаны на рисунке 3.3. При температуре -30°C , входная мощность преобразователя имеет максимум при $\gamma = 0,59$, что соответствует близкому к единице коэффициенту использования $K_P \rightarrow 1$. Коэффициент полезного действия в этой точке имеет минимум и составляет 0,93%. Следует отметить, что во всем диапазоне регулирования γ напряжение СБ превышает напряжение АБ, т.е. $U_{CB}^* > 1$. Увеличение напряжения СБ ограничено напряжением холостого хода СБ, которое достигается при $\gamma = 0,46$, в случае дальнейшего уменьшения γ преобразователь переходит в режим прерывистого тока, и его параметры не могут описываться характеристикой (3.3), полученной при условии непрерывности тока дросселя.

Уменьшение напряжения оптимальной точки ВАХ до значения $U_0 = 21,8$ В при $U_{AB} = 24$ В не позволяет эффективно применять преобразователь понижающего типа, о чем свидетельствуют характеристики, представленные на рисунке 3.3, б. Видно, что диапазон регулирования преобразователя в этом случае очень узкий, заключен в интервале 24–25 В и не охватывает точку ВВХ с максимальной мощностью. Коэффициент использования в этом случае $K_P = 0,33$ при $\gamma = 1$. Результаты говорят об эффективности применения в этом случае повышающего преобразователя, позволяющего получить напряжение СБ меньше напряжения АБ ($U_{CB} < U_{AB}$).

Повышающий преобразователь (рисунок 3.1, б) имеет на входе дроссель L_1 , обеспечивающий непрерывность входного тока и стабильность рабочей точки ВАХ по току. Учитывая импульсный режим заряда конденсатора C_1 , необходим выходной дроссель L_2 , обеспечивающий заряд АБ постоянным током. Регулировочная характеристика повышающего преобразователя при работе от идеального источника напряжения при условии непрерывности тока дросселя L_1 описывается соотношением:

$$\frac{U_{ВВХ}}{U_{ВХ}} = \frac{1-\gamma}{(1-\gamma)^2 + R_{L1}/R_H}. \quad (3.4)$$

Характеристика идеального преобразователя показывает увеличение напряжения на всем диапазоне регулирования, но наличие потерь во входном дросселе приводит к ее искажению при больших значениях γ , что связано с резким ростом входного тока по отношению к выходному [52]. Для определения регулировочной характеристики, соответствующей режиму работы от СБ на нагрузку в виде АБ, произведены преобразования, аналогичные проведенным для понижающего преобразователя, и получено выражение:

$$U_{СБ}^* = R_{L1}^* \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{КЗ}} \right)^{\frac{U_{XX} - U_{СБ}}{U_{XX} - U_0}} \right) + (1 - \gamma). \quad (3.5)$$

Характеристики повышающего преобразователя, полученные по формуле (3.5) при тех же параметрах, представлены графически на рисунке 3.3. Результаты показывают, что преобразователь повышающего типа имеет линейную регулировочную характеристику, при этом обусловленная потерями входного дросселя нелинейность, свойственная уравнению (3.4), в уравнении (3.5) отсутствует, что объясняется тем, что рабочая точка СБ в этом случае находится на ветви стабилизации тока. Практическим выводом является невозможность этой схемы настроиться на точку ВАХ СБ с максимальной мощностью при $U_0 > U_{АБ}$, в результате чего коэффициент использования СБ составляет $K_p = 0,65$ и соответствует $\gamma = 0$.

Добиться успешного регулирования точки ВАХ с максимальной мощностью при любом соотношении напряжений $U_{АБ}$ и U_0 можно с помощью составного широкодиапазонного преобразователя, например, преобразователя Кука, имеющего входной каскад на основе повышающего, а выходной на основе понижающего преобразователя (рисунок 3.1, в). Регулировочная характеристика преобразователя Кука описывается соотношением [52]:

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \cdot \frac{1}{R_{L1}/R_H \cdot \left(\frac{\gamma}{1 - \gamma} \right)^2 + R_{L2}/R_H + 1},$$

при этом для соотношения токов выполняется условие

$$\frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{1-\gamma}{\gamma}.$$

Получить характеристики преобразователя Кука при работе от СБ на АБ можно, решив уравнение относительно переменной γ , при подстановке $\Psi = \frac{1-\gamma}{\gamma}$ уравнение примет вид

$$U_{\text{СБ}}^* = \Psi^2 \frac{R_{L2}}{U_{\text{АБ}}} I_{\text{СБ}} + \Psi + \frac{R_{L1}}{U_{\text{АБ}}} I_{\text{СБ}}$$

и имеет один положительный корень

$$\Psi = \frac{\sqrt{U_{\text{АБ}}^2 + 4R_{L2}I_{\text{СБ}}(U_{\text{СБ}} - R_{L1}I_{\text{СБ}})} - U_{\text{АБ}}}{2R_{L2}I_{\text{СБ}}},$$

который с учетом (3.2) позволяет получить искомую аналитическую связь.

Результаты решения уравнения представлены на рисунке 3.3. Видно, что преобразователь Кука позволяет регулировать напряжение СБ в точках, близких к максимальной мощности, т.е. получить $K_P \rightarrow 1$ как в случае $U_0 > U_{\text{АБ}}$ при $\gamma = 0,38$ с КПД, равным $\eta = 0,91$, так и при $U_0 < U_{\text{АБ}}$ при $\gamma = 0,58$ и $\eta = 0,92$.

Таким образом, при прочих равных условиях преобразователь Кука является единственным бестрансформаторным преобразователем, позволяющим получить близкий к единице коэффициент использования СБ при любом соотношении напряжений U_0 и $U_{\text{АБ}}$. Следует учитывать, что преобразователь Кука производит двойное преобразование энергии и имеет завышенную – по отношению к рассмотренным схемам – габаритную мощность силовых элементов. Это проявляется при выборе транзистора, коммутирующего суммарный ток АБ и СБ, а также в наличии сразу двух дросселей L_1 и L_2 . Ухудшение КПД преобразователя, связанное с введением дополнительного дросселя, можно наблюдать по данным таблицы 3.1 и рисунка 3.3.

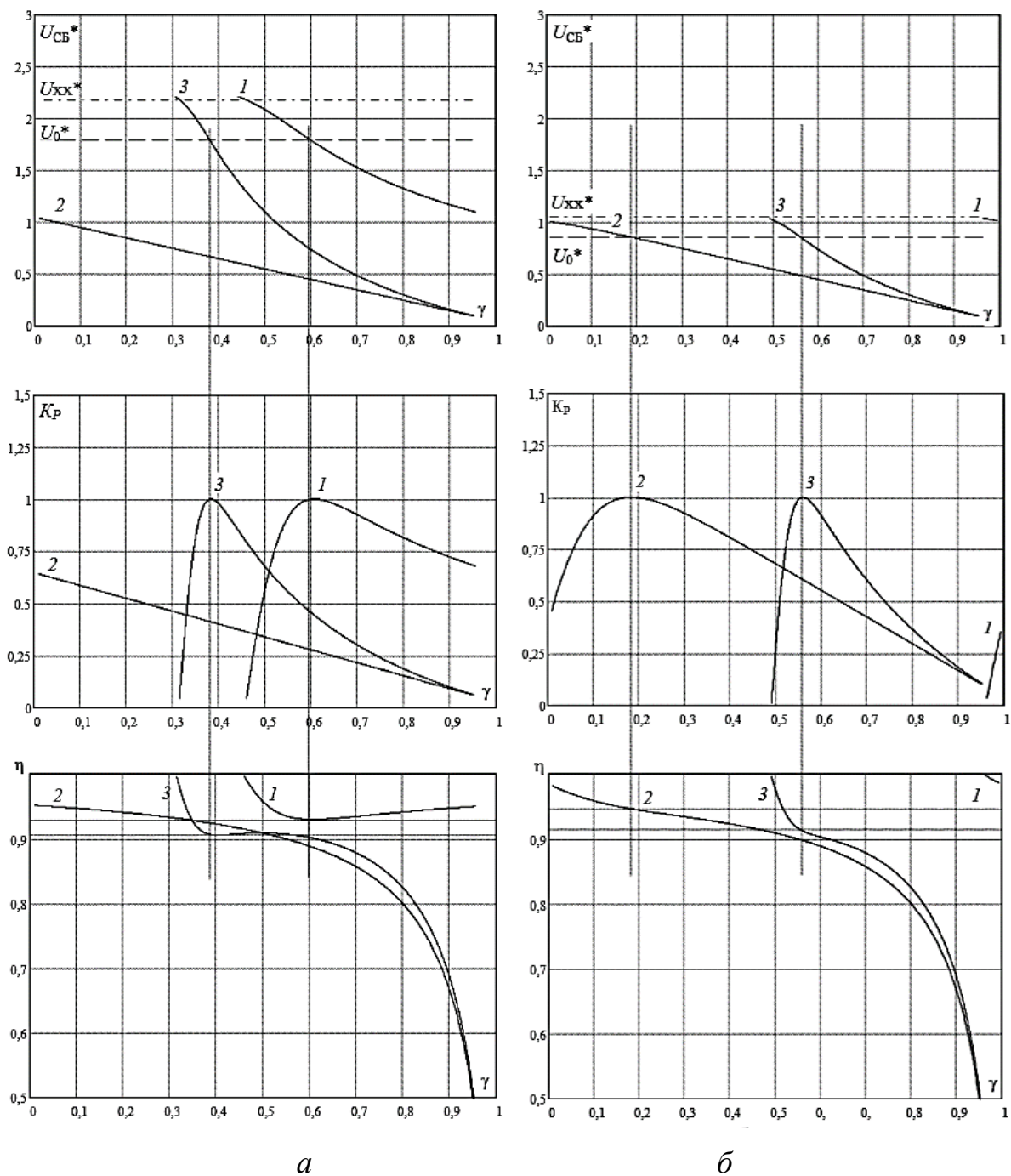


Рисунок 3.3 – Характеристики преобразователя энергии солнечной батареи на основе понижающего преобразователя (1), повышающего (2), преобразователя

Кука (3) при $U_{AB} = 24В$, $R_{L1}^* = 0,05$ и параметрах:

a – ВАХ1 $U_0 > U_{AB}$; b – ВАХ2 $U_0 < U_{AB}$

Для упрощения сравнительного анализа данные расчетов сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры схем преобразователей постоянного напряжения

Схема преобразователя	ВAX1 ($U_0 > U_{AB}$)		ВAX2 ($U_0 < U_{AB}$)	
	КПД, η	K_P	КПД, η	K_P
Понижающий преобразователь	0,93	1	0,98	0,33
Повышающий преобразователь	0,95	0,65	0,95	1
Преобразователь Кука	0,91	1	0,92	1

Сопоставление преобразователей постоянного напряжения по критериям коэффициента использования мощности солнечной батареи и коэффициента полезного действия показывает, что преобразователь Кука, за счет широкого диапазона регулирования, имеет лучший K_P фактически при любых условиях работы ($K_P \rightarrow 1$), но худшие значения КПД.

Повышающий преобразователь работает в режимах СБ, которые наблюдаются при затенении или выходе Солнца из тени. Они как правило, кратковременны, поэтому применение данного преобразователя в КЗАБ нецелесообразно.

Понижающий преобразователь наиболее просто согласуется с системами экстремального регулирования мощности солнечных батарей путем регулирования скважности работы силовых ключей и при стандартных ВAX наиболее оптимален для применения в контроллерах заряда АФЭУ с ЭРМ СБ.

3.2 Способы регулирования максимума мощности солнечных батарей

Для получения максимальной энергии от солнечной батареи необходимо осуществлять поиск точки оптимума ВAX фотоэлектрических преобразователей. Поиск и поддержание оптимального энергетического режима позволяет получить дополнительную энергию, повысив тем самым энергетическую эффективность фотоэлектрической установки [53, 54, 55].

Существует ряд систем экстремального регулирования с различными способами организации поиска экстремума: шаговым, вычисления производной, напряжения холостого хода, токовой развертки, гибридным, нечеткой логики. Многие производители контроллеров заряда имеют фирменные названия для своего метода поиска точки максимальной мощности СБ, но в конечном счете все эти методы являются вариациями шагового способа (итерации вокруг точки экстремума).

В шаговом способе система поиска экстремума ВАХ на небольшую величину изменяет входное сопротивление, вследствие чего изменяется напряжение массива фотопреобразователей. После чего проводится измерение мощности, если мощность увеличивается – контроллер продолжает изменять напряжение в этом же направлении, пока мощность не будет уменьшаться. Алгоритм шагового способа представлен на рисунке 3.4. Распространенность данного способа обусловлена простотой его реализации, несмотря на то, что он приводит к колебаниям мощности [56, 57].

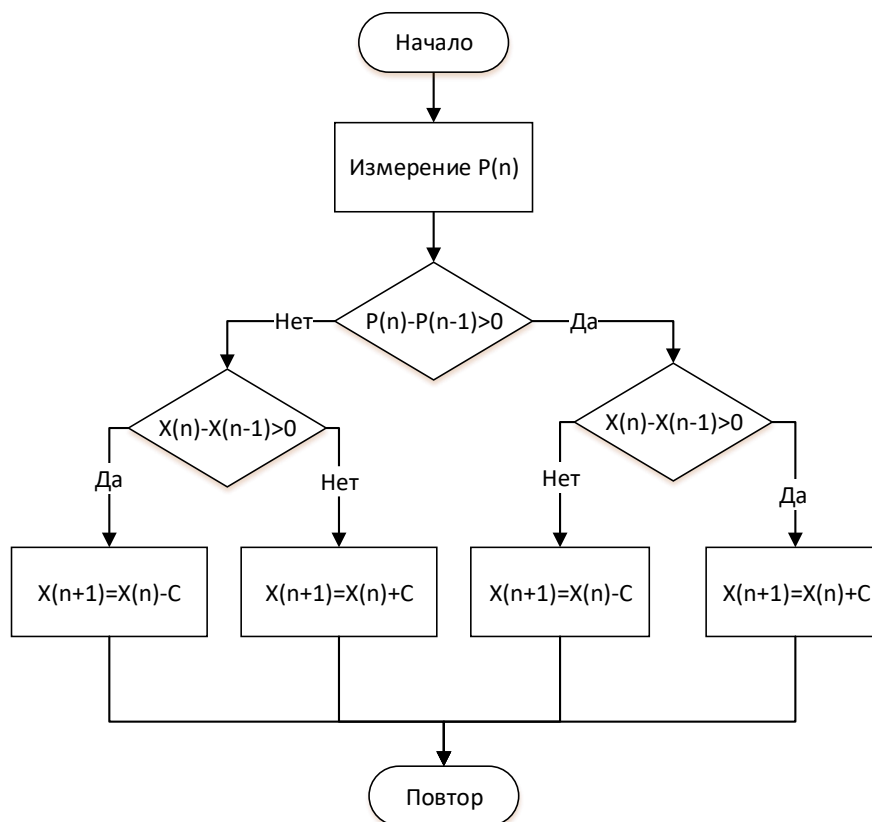


Рисунок 3.4 – Алгоритм шагового способа поиска экстремума

Способ вычисления производной основан на том, что значение производной в точки максимума мощности ВАХ солнечной батареи равно нулю. Контроллер производит вычисление для определения знака изменения мощности по отношению к напряжению, чтобы предсказать эффект от изменения напряжения. В соответствии с алгоритмом способа вычисления производной (рисунок 3.5) контроллер проводит вычисления, определяя точку максимальной мощности и сравнивая значение $I\Delta/U\Delta$ с I/U [58, 59].

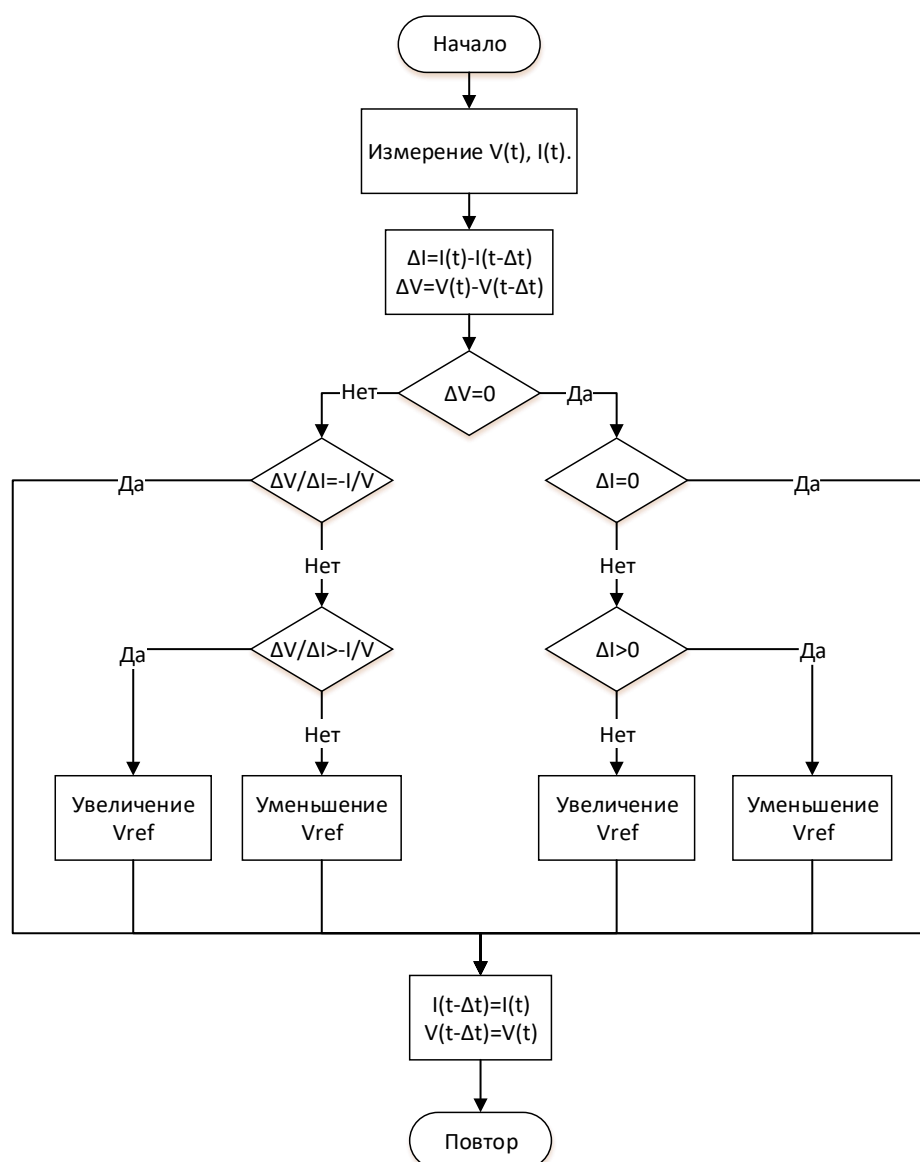


Рисунок 3.5 – Алгоритм способа поиска экстремума по производной

При условии равенства величин ($I/V = I\Delta/V\Delta$) выходное напряжение соответствует значению максимальной мощности. Экстремальный регулятор

поддерживает это напряжение, пока не изменятся условия освещенности, после чего цикл алгоритма повторяется. Этот способ более требователен к вычислительной мощности контроллера, но при быстро изменяющейся инсоляции способен отслеживать точку максимума лучше шагового.

Также известен способ напряжения холостого хода (постоянного напряжения). Термин «способ постоянного напряжения» в классификации способов ЭРМ СБ применяется авторами для описания разных техник. Чаще всего это способ, при котором выходное напряжение регулируется постоянной величиной независимо от условий, или способ, в котором величина определяется отношением текущего выходного напряжения к напряжению холостого хода. Рабочая точка в данном случае не является точкой максимальной мощности, но этот способ в постоянных быстро изменяющихся условиях инсоляции, в отличие от других, продолжает работать. Чаще всего используется совместно с другими способами регулирования максимума мощности.

Система экстремального регулирования, функционирующая по этому способу, отключает СБ от нагрузки и проводит измерение напряжения холостого хода, после чего задает рабочее значение напряжения с постоянным коэффициентом. Вследствие чего рабочая точка фотоэлектрического модуля находится рядом или непосредственно в точке оптимума ВАХ СБ [59].

Гибридный способ поиска точки максимальной мощности ВАХ СБ сочетает в себе несколько способов поиска экстремума. Одно из самых распространенных сочетаний – это шаговый способ и способ напряжения холостого хода. Алгоритм представлен на рисунке 3.6. Во время первого цикла поиска точка максимума мощности с малой точностью оценивается на основе способа напряжения холостого хода. После чего во время второго цикла алгоритма на основе шагового способа производится точное определение экстремума ВАХ СБ.

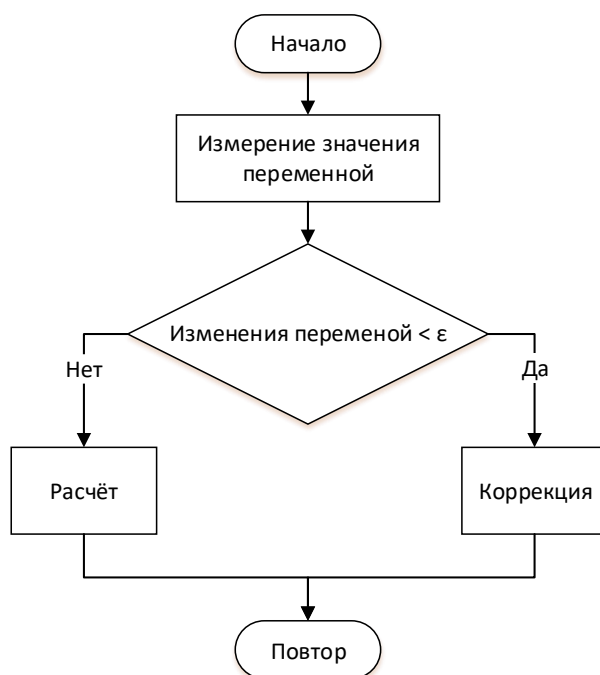


Рисунок 3.6 – Цикл алгоритма гибридного способа поиска экстремума

Шаговый способ и способ вычисления производной могут определить локальный максимум мощности и обеспечить истинную точку экстремума ВАХ СБ. Основным минусом шагового способа является то, что система, находясь в оптимальной точке ВАХ, создает колебания выходной мощности ФЭП даже при постоянном уровне освещенности, что приводит к незначительным потерям мощности.

Способ вычисления производной по сравнению с шаговым может определить экстремум без колебаний выходной мощности. Но при быстро изменяющихся условиях инсоляции может работать хаотично. Этот способ более требователен к вычислительной мощности контроллера, что может привести к снижению частоты дискретизации и дополнительным потерям энергии солнечной батареи.

В способе напряжения холостого хода во время проведения измерений теряется выработанная СБ энергия. Также приведенная величина отношения точки максимальной мощности к напряжению холостого хода (как правило, 76 %) не всегда является точной для конкретного случая.

3.3 Моделирование систем экстремального шагового регулирования мощности солнечной батареи

Требования, предъявляемые к экстремальным системам, и особенности ВАХ СБ, обуславливают необходимость исследовать точность регулирования экстремума в зависимости от шагового изменения напряжения стабилизации СБ ($\Delta U_{ст}$) и определить быстродействие экстремального регулятора, гарантирующее устойчивость системы при дрейфе вольт-амперной характеристики.

При проектировании автономных фотоэлектрических энергетических установок с ЭШР с целью прогнозирования их энергетической эффективности необходимо знать зависимость точности регулирования экстремума от шагового изменения напряжения стабилизации СБ. Для этого построена имитационная модель АФЭУ в графической среде имитационного моделирования MatLab Simulink (рисунок 3.7).

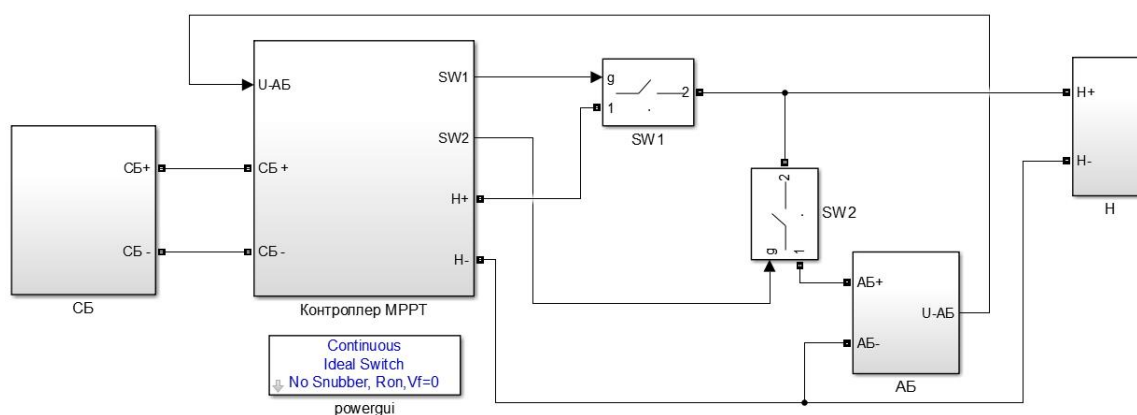


Рисунок 3.7 – Имитационная модель АФЭУ

Модель состоит из солнечной и аккумуляторной батарей, нагрузки (Н), контроллера заряда с функцией экстремального регулирования мощности СБ (Контроллер MPPT) и ключей (SW1, SW2) для переключения между режимами работы энергетической установки (электропитание нагрузки от АБ или СБ). Ниже представлены модели каждого блока системы.

Модель контроллера заряда АБ с функцией ЭШР СБ (рисунок 3.8) состоит из датчиков тока и напряжения (С.М.1, С.В.1), силовой части (понижающий преобразователь) и блока контроллера, реализованного с помощью MatLab Function. В функции реализован алгоритм экстремального шагового регулирования мощности с возможностью изменения его параметров (частота шага регулирования, величина шага).

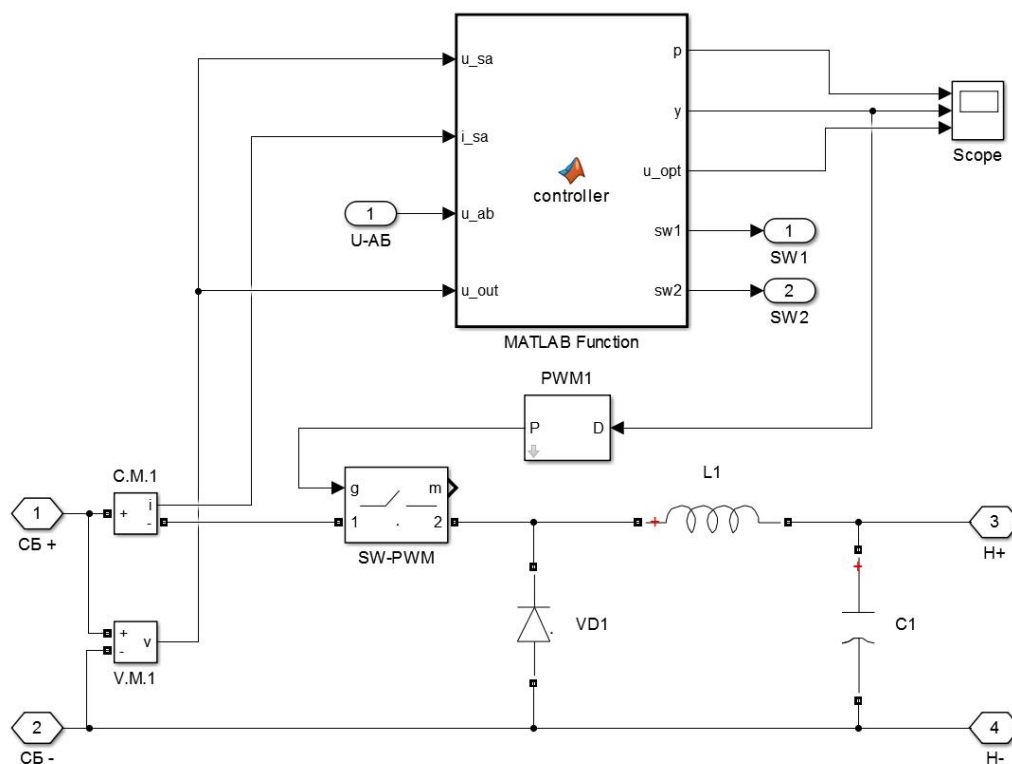


Рисунок 3.8 – Модель контроллера заряда АБ с функцией ЭШР СБ

На рисунке 3.9 представлена разработанная модель солнечной батареи, в которой предусмотрена возможность задания таких параметров, как ток короткого замыкания, напряжение холостого хода солнечного элемента, температура окружающей среды, уровень освещенности ФЭП, а также количество фотоэлектрических преобразователей в СБ. Модель построена на основе источника тока и MatLab Function, а также блока J, с помощью которого задается освещенность СБ.

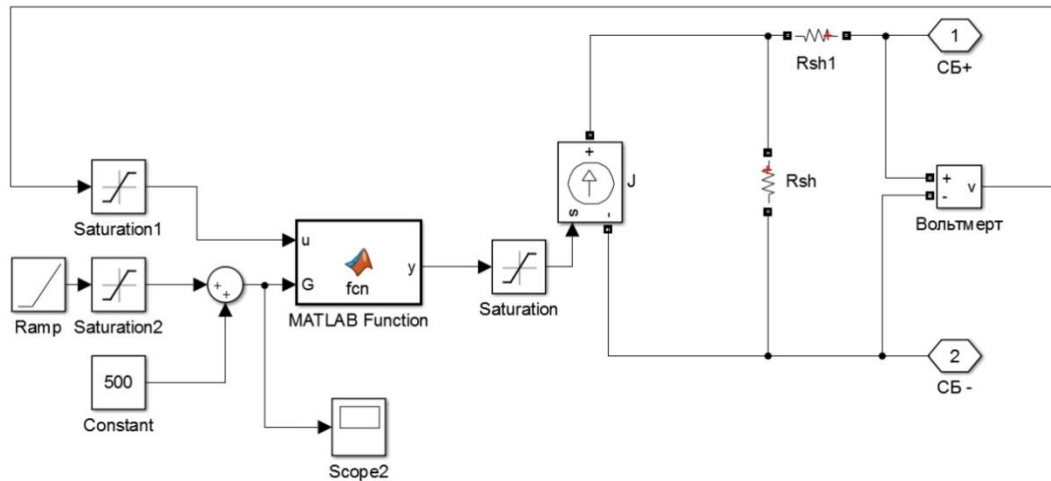
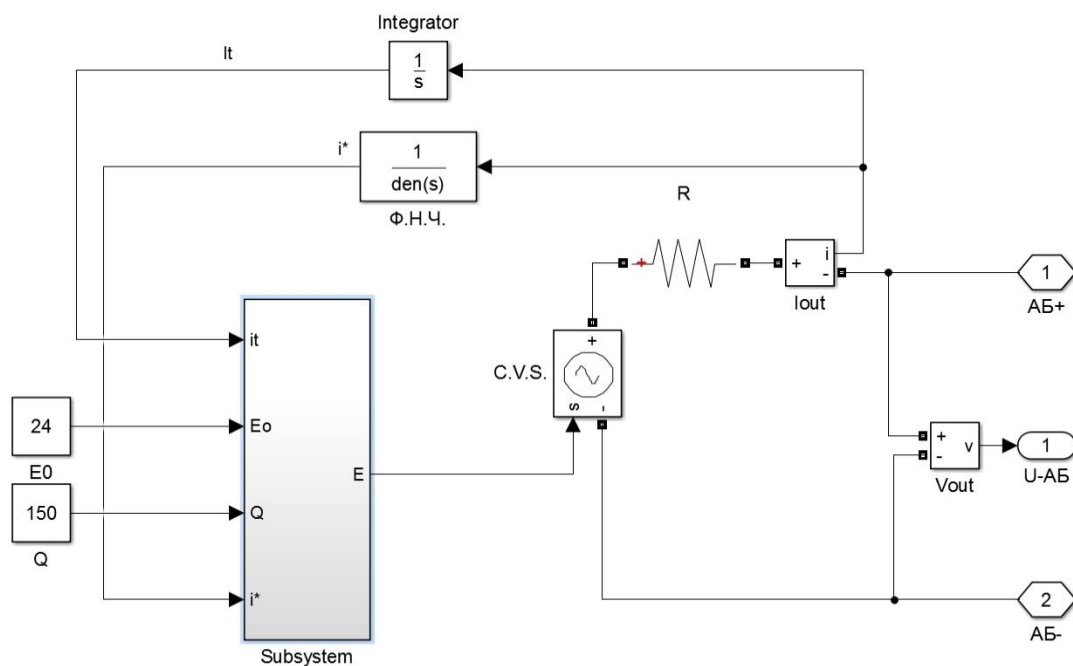


Рисунок 3.9 – Модель солнечной батареи

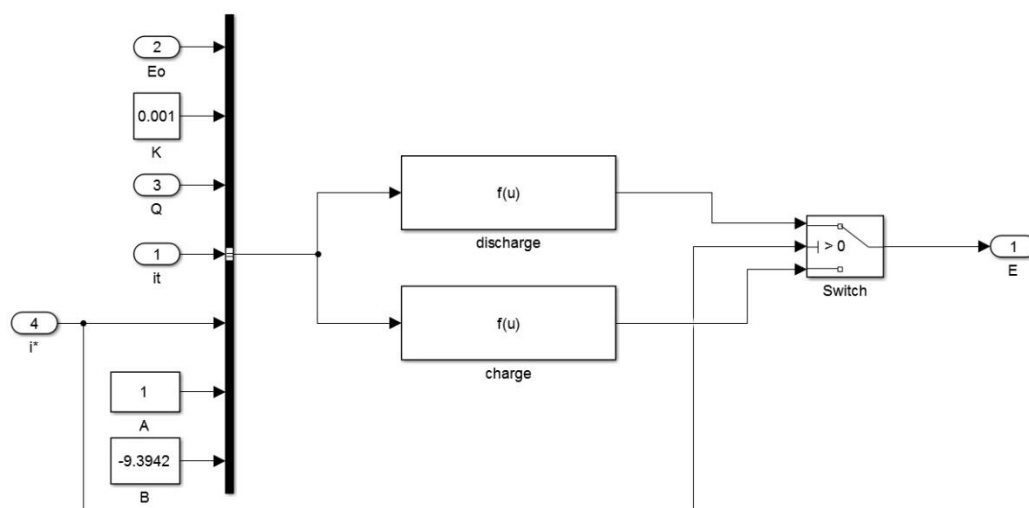
На рисунке 3.10 а представлена модель аккумуляторной батареи, входящей в состав АФЭУ, которая реализована на основе источника напряжения, с возможностью задания номинальной емкости и напряжения, а также возможностью заряда и разряда (рисунок 3.10 б).

Все измерения производятся с помощью блоков вольтметров, амперметров и осциллографов. Параметры всех блоков модели АФЭУ были заданы с учетом технических характеристик, а также на основе полученных экспериментальных данных.

Разработанная модель АФЭУ адекватно отображает логику работы реальной энергетической установки, что позволяет использовать ее при проектировании таких систем.



а



б

Рисунок 3.10 – Модель АБ входящей в состав АФЭУ:

а – структура модели; б –Subsystem

Вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики фотоэлектрических панелей КСМ-160 при разных значениях температуры и освещенности, измеренные в разное время года, приведены на рисунке 3.11, из анализа которых следует, что значение генерируемой мощности существенно зависит от места расположения солнечной батареи и условий ее эксплуатации, реальные

практические значения $U_{\text{опт}}$ находятся в пределах 22 - 44 В. Диапазон изменения $U_{\text{опт}}$ 22 - 35 В панелей КСМ-160, приведенный в технических характеристиках производителя СБ (ОАО «НПП «Квант» г. Москва), отличается от экспериментально измеренных значений. Это объясняется тем, что производитель фотоэлектрических панелей приводит технические характеристики при температуре модуля 25 °С.

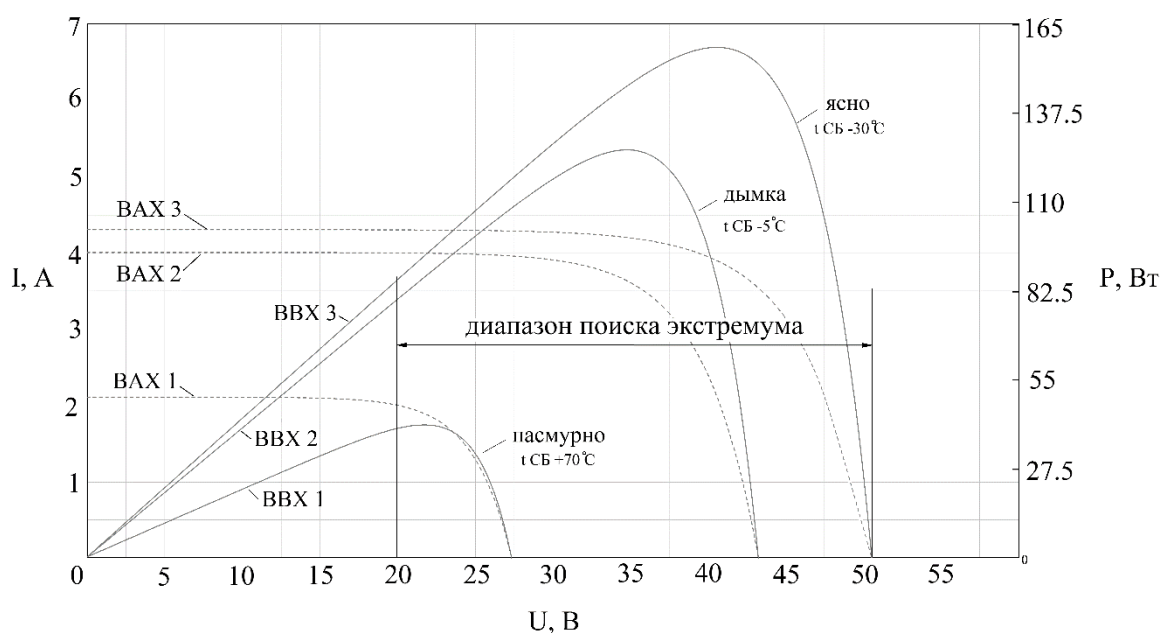


Рисунок 3.11 – Семейство вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик фотоэлектрических панелей КСМ-160 при различной температуре и степени освещенности

Температура фотоэлектрических панелей существенно зависит от конструкции, интенсивности охлаждения потоками ветра и уровня освещенности, и даже зимой на открытых площадках при слабом ветре превышает температуру воздуха на 10-20 градусов. Летом, в закрытых от ветра местах, перегрев панелей солнечной батареи может достигать 30-40 °С. Таким образом, из анализа ВАХ и ВВХ солнечных батарей следует, что при проектировании энергетических установок с ЭШР необходимо принимать рабочий температурный диапазон фотоэлектрических модулей от -30 до + 70 °С, что ведет к изменению $U_{\text{опт}}$ и $U_{\text{хх}}$ стандартных фотоэлектрических панелей, например КСМ-160, на 25 В.

Следовательно, рабочий диапазон поиска экстремума мощности должен быть не менее 30 В (20-50 В) (см. рисунок 3.7).

На рисунках 3.12 - 3.20 представлены временные диаграммы, полученные с помощью разработанной модели АФЭУ. На них приведены характеристики контроллера заряда АБ (ток, напряжение, мощность) в режиме экстремального шагового регулирования мощности СБ, при постоянном уровне освещенности и различных параметрах ЭШР.

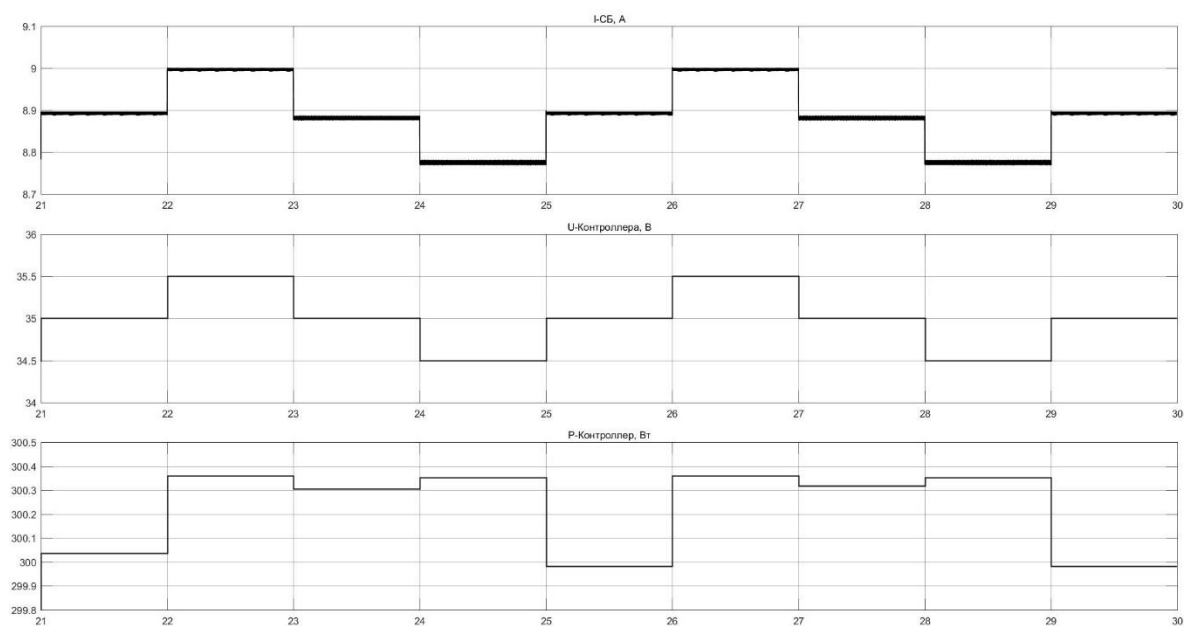


Рисунок 3.12 –Временные диаграммы характеристик контроллера заряда в режиме ЭШР (величина шага – 0,5 В, частота шага – 1 Гц)

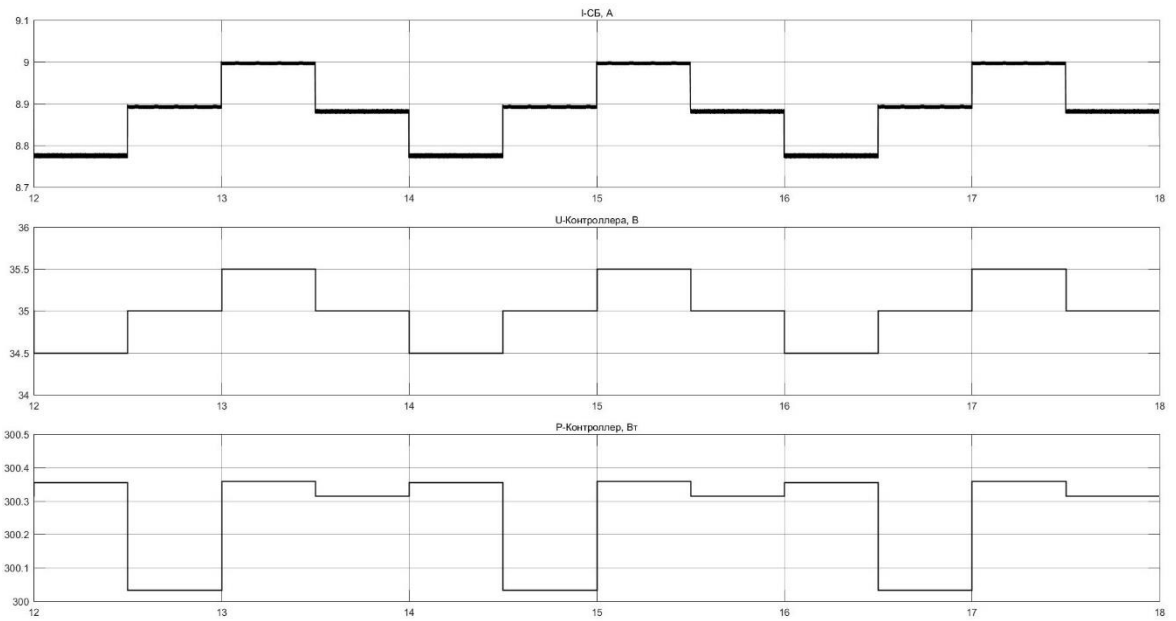


Рисунок 3.13 – Временные диаграммы характеристик контроллера заряда в режиме ЭШР (величина шага – 0,5 В, частота шага – 2 Гц)

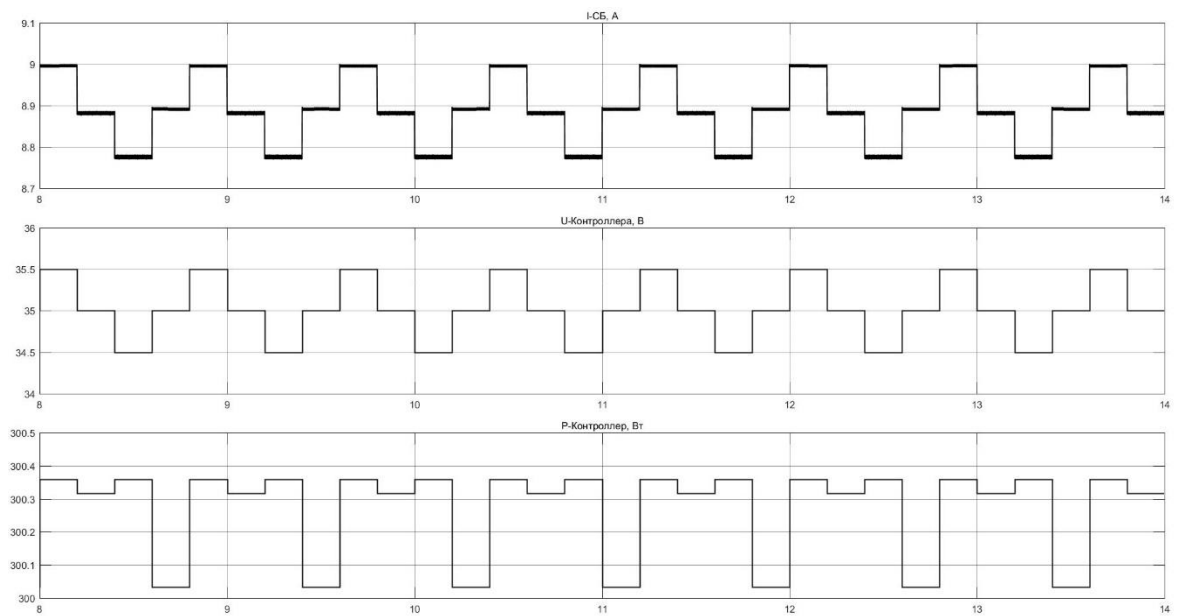


Рисунок 3.14 – Временные диаграммы характеристик контроллера заряда в режиме ЭШР (величина шага – 0,5 В, частота шага – 5 Гц)

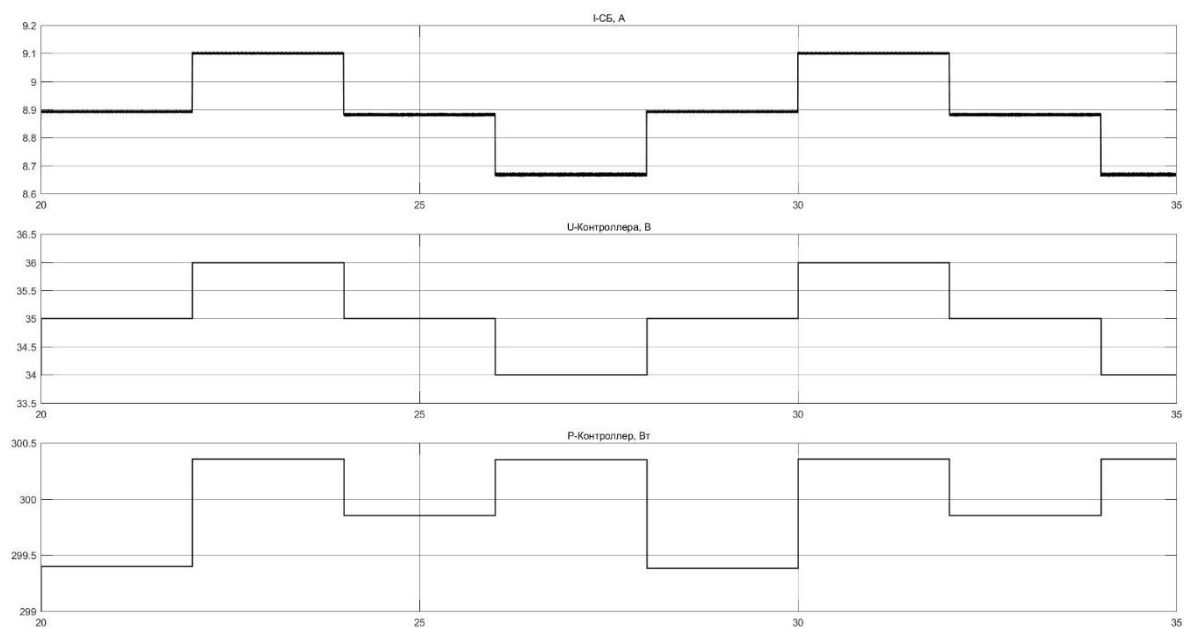


Рисунок 3.15 –Временные диаграммы характеристик контроллера заряда в режиме ЭШР (величина шага – 1 В, частота шага – 0,5 Гц)

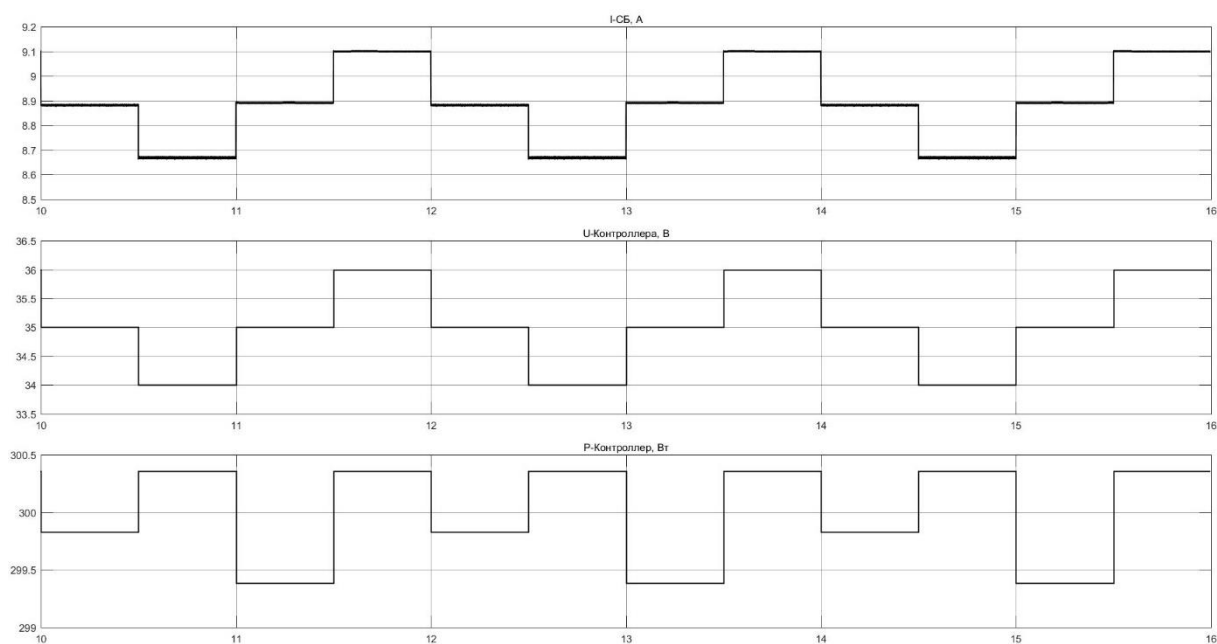


Рисунок 3.16 – Временные диаграммы характеристик контроллера заряда в режиме ЭШР (величина шага – 1 В, частота шага – 2 Гц)

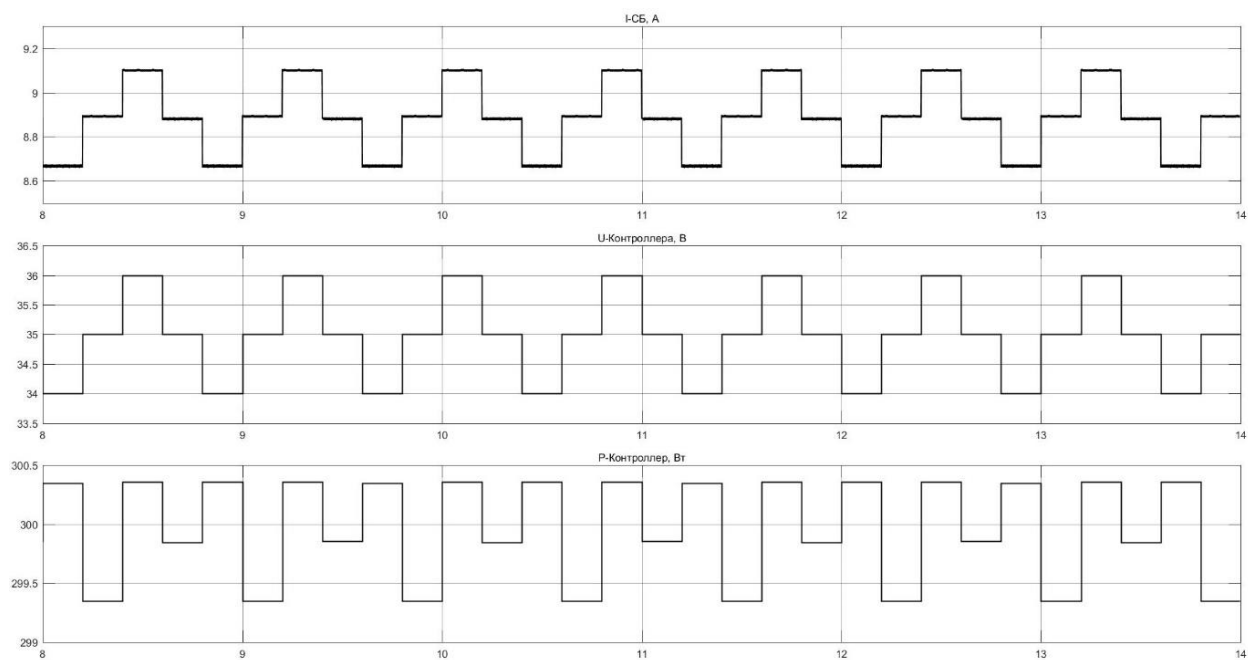


Рисунок 3.17 – Временные диаграммы характеристик контроллера заряда в режиме ЭШР (величина шага – 1 В, частота шага – 5 Гц)

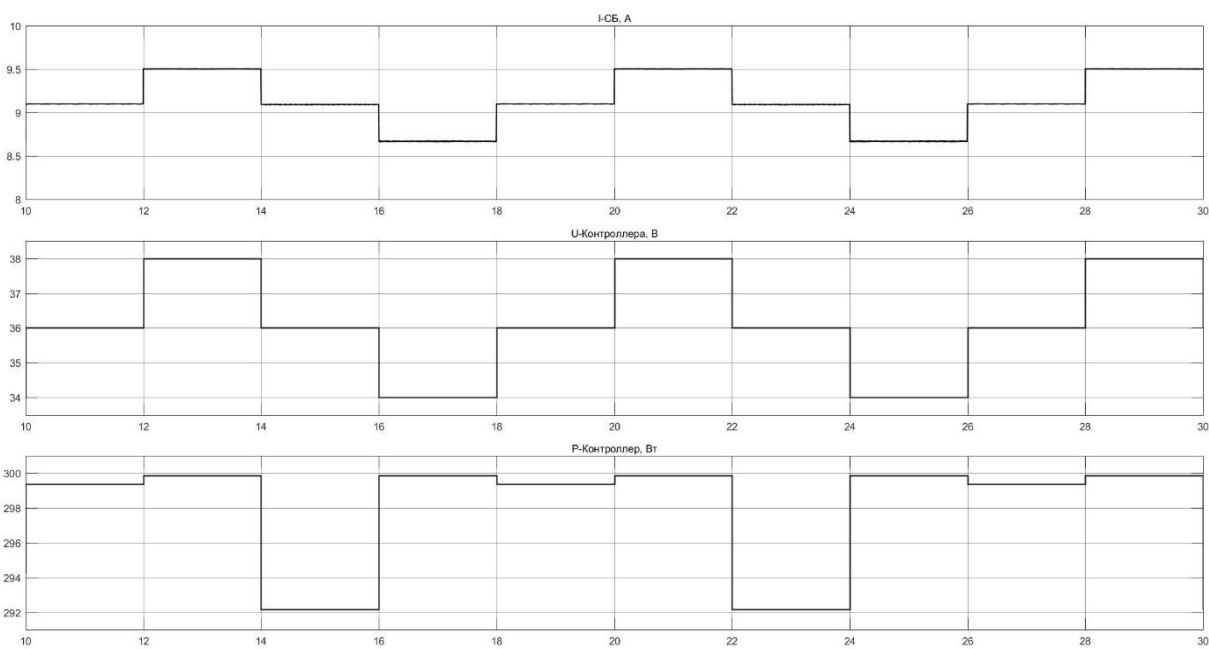


Рисунок 3.18 – Временные диаграммы характеристик контроллера заряда в режиме ЭШР (величина шага – 2 В, частота шага – 0,5 Гц)

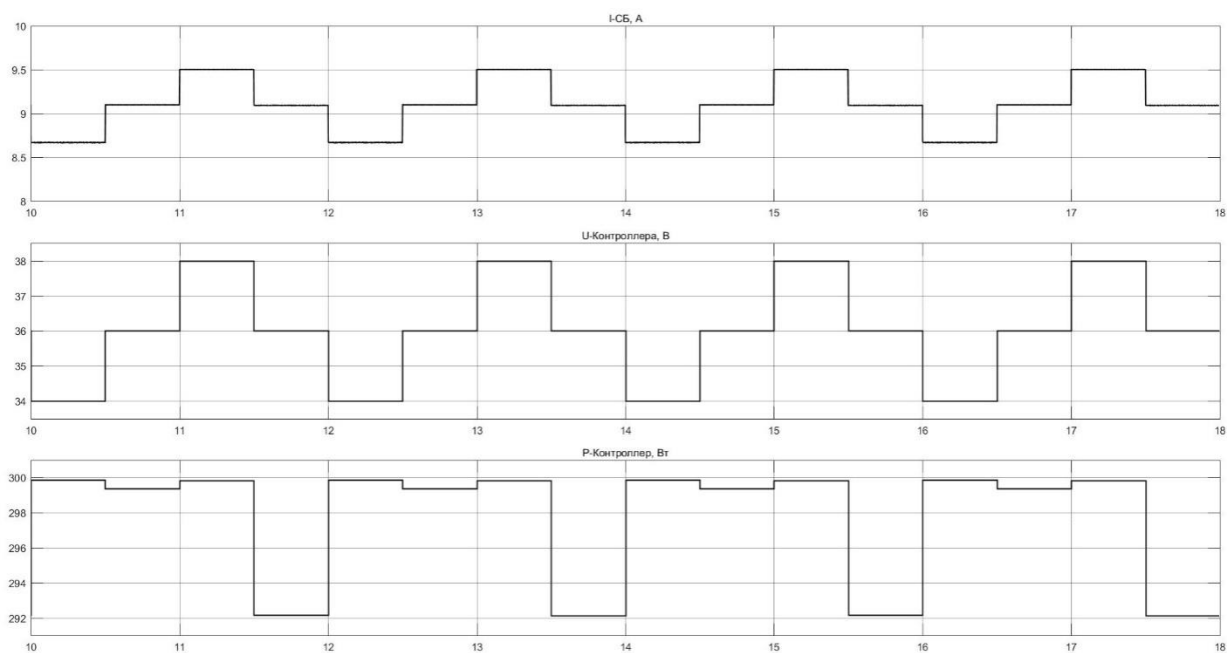


Рисунок 3.19 – Временные диаграммы характеристик контроллера заряда
в режиме ЭШР (величина шага – 2 В, частота шага – 2 Гц)

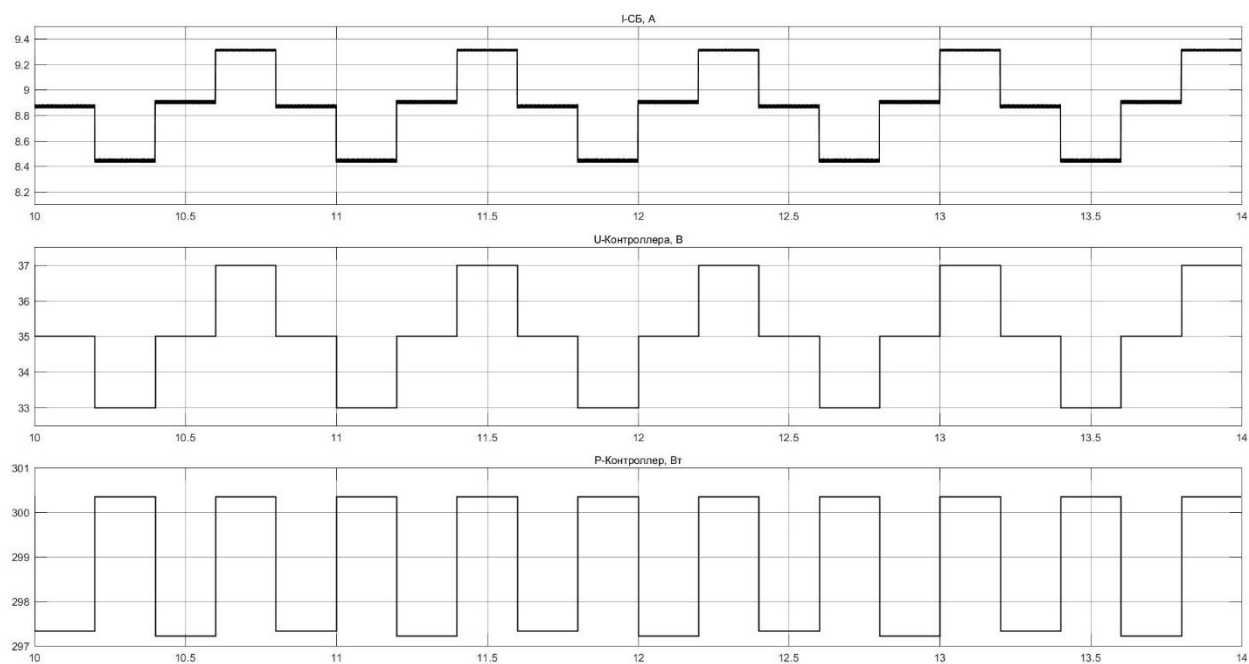


Рисунок 3.20 – Временные диаграммы характеристик контроллера заряда
в режиме ЭШР (величина шага – 2 В, частота шага – 5 Гц)

На основе результатов моделирования рассчитана зависимость энергетической эффективности использования СБ по мощности $P_{CB}/P_{\text{макс.СБ}}$ от

значения шагового изменения $U_{СБ}$ ($\Delta U_{ст}$), результаты приведены в таблице 3.2 и на рисунке 3.21, где $P_{нд}$ – недоиспользованная мощность СБ. Из анализа значений энергетической эффективности использования СБ по мощности следует, что при пошаговом изменении $U_{СБ}$, до 2 В гарантируется отбор максимальной мощности от СБ с точностью не менее 98% ($P_{СБ} < 2\% P_{макс.СБ}$).

Таблица 3.2 – Значение энергетической эффективности использования СБ по мощности от значения шагового изменения

Параметр	Значение			
$\Delta U_{ст}, В$	0,5	1	1,5	2
$P_{СБ}/P_{макс.СБ}, \%$	99,7	99,6	99,2	98,5

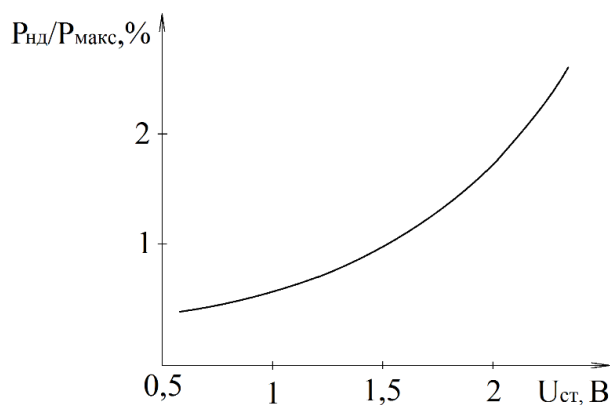


Рисунок 3.21 – Зависимость энергетической эффективности использования СБ по мощности от значения шагового изменения

В системе автоматической оптимизации шагового типа при неизменных условиях эксплуатации теоретически возможное минимальное количество шагов два или три [60]. Двухшаговый режим поиска экстремума мощности осуществляется, когда рабочая точка на ВВХ при очередном шаговом изменении $U_{СБ}$ попадает в область оптимального значения мощности СБ (рисунок 3.22) и при каждом втором шаговом изменении $U_{СБ}$ происходит уменьшение мощности, генерируемой СБ.

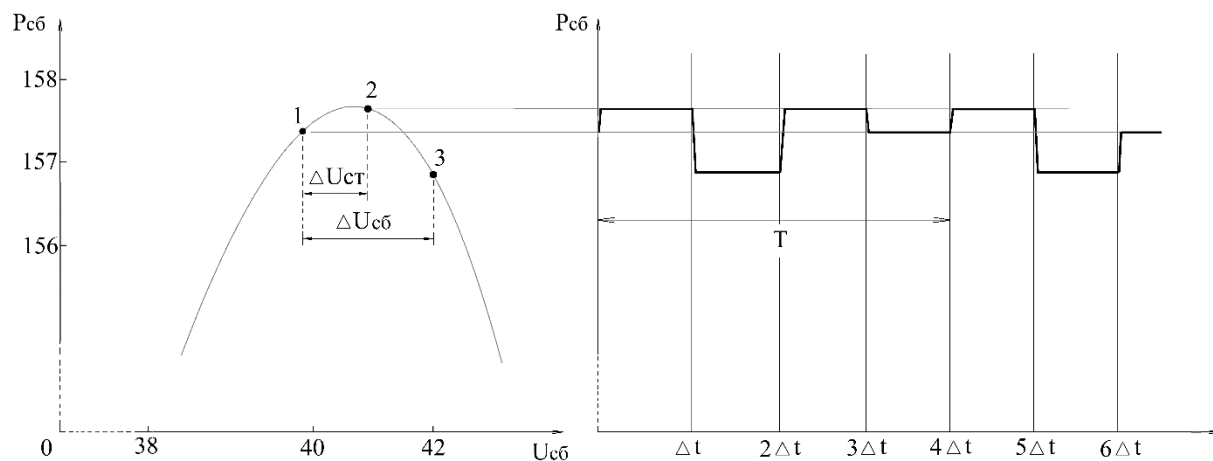


Рисунок 3.22 – Диаграмма двухшагового режима поиска экстремума мощности СБ

Трехшаговый режим теоретически возможен в аналоговых системах измерения мощности СБ и наличии гистерезиса в системе сравнения мощности при каждом шаговом изменении $U_{сб}$ ($\Delta U_{ст}$). В системе автоматической оптимизации шагового типа с цифровыми системами измерения мощности СБ трехшаговый режим практически невозможен.

Характеристики СБ (ВАХ, ВВХ) автономных энергетических установок изменяются при изменении условий эксплуатации. При затенении фотоэлектрических панелей облаками изменяется освещенность. Время наступления затенения как правило составляет 5-10 секунд, однако при этом преимущественно изменяется уровень генерируемой мощности, но практически не успевает измениться температура панелей, поэтому каких-либо затруднений регулирования экстремума мощности не происходит. При большой скорости изменения освещенности теоретически система может перейти в одношаговый режим, т.е. направление поиска экстремума мощности изменяется после каждого шага. Схематически процесс регулирования в этом случае показан на рисунке 3.23. Измерение мощности экстремальным регулятором производится в точках 2' и 3' [14].

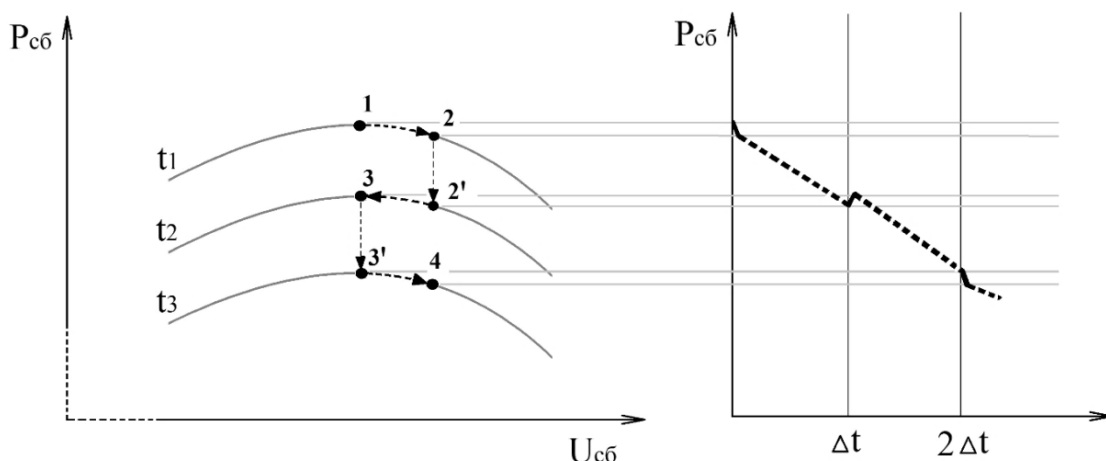


Рисунок 3.23 – Диаграммы регулирования экстремума мощности СБ при затенении фотоэлектрических панелей облаками

Экспериментально установлено (рисунок 3.24), что охлаждение фотоэлектрических панелей после их плотного затенения облаками до температуры окружающего воздуха происходит за 10-12 минут. При появлении Солнца температура фотоэлектрических панелей может максимально повыситься на 40°C также за 10-12 минут, т.е. максимальное значение скорости дрейфа ВВХ ($V_{U_{\text{СБ}}}$) может составлять $\approx 0,03 \text{ В/с}$ [14].

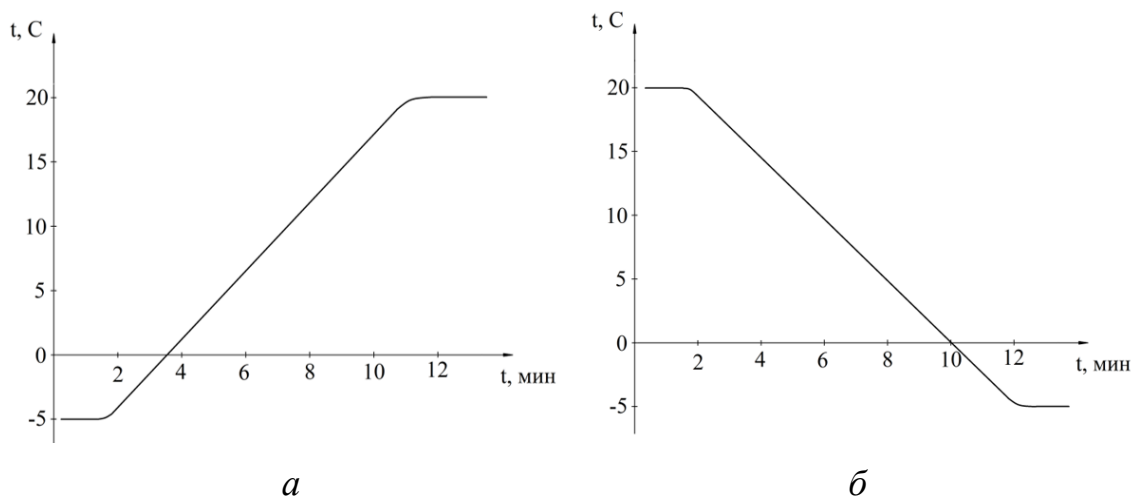


Рисунок 3.24 – Зависимость изменения температуры СБ от времени при нагреве (а) и охлаждении (б) фотоэлектрической панели

Требуемое быстроедействие экстремального регулятора в зависимости от значения шага $\Delta U_{\text{ст}}$ находится из выражения [61]:

$$\Delta t = 1/f_{\text{шр}} \leq \Delta U_{\text{ст}}/V_{U_{\text{СБ}}}, \quad (3.6)$$

где $V_{U_{\text{СБ}}}$ – скорость изменения напряжения СБ в оптимальной точке.

Но это условие является достаточным лишь для случаев горизонтального дрейфа ВВХ СБ, т.е. при $P_{\text{СБ макс}}(t) = \text{const}$. Такой режим возможен только теоретически, при пропорциональном влиянии на дрейф ВВХ температуры и освещенности. Так как в подавляющем большинстве случаев дрейф ВВХ при прогреве панелей СБ сопровождается уменьшением экстремального значения мощности, то при некорректном выборе частоты шага, близком к критическому значению $\Delta U_{\text{ст}}/V_{U_{\text{СБ}}}$, возможен реверс системы вследствие уменьшения мощности СБ даже при движении рабочей точки в сторону экстремума мощности (рисунок 3.25). Поэтому для обеспечения устойчивости необходимо выполнение дополнительного условия $\Delta P_{\text{СБ}} \geq 0$, т.е. увеличение мощности, вызванное шаговым изменением $U_{\text{СБ}}$, должно компенсировать ее уменьшение, обусловленное дрейфом характеристики [60].

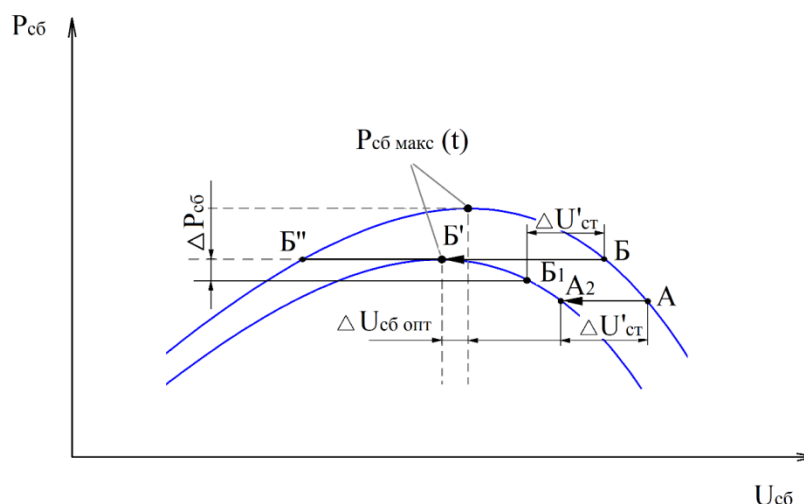


Рисунок 3.25 – Диаграммы дрейфа ВВХ СБ

Уравнение дрейфующей ВВХ, аппроксимированной квадратичной параболой, имеет вид:

$$P_{\text{СБ}}(U_{\text{СБ}}; t) = a(t)[U_{\text{СБ}} - U_{\text{СБопт}}(t)]^2 + P_{\text{СБмакс}}(t), \quad (3.7)$$

$$P_{\text{СБмакс}}(t) = P_{\text{СБмакс}}(t - \Delta t) + \Delta P_{\text{СБмакс}}(\Delta t);$$

$$U_{\text{СБопт}}(t) = U_{\text{СБопт}}(t - \Delta t) + \Delta U_{\text{СБопт}}(\Delta t);$$

$$a(t) = a(t - \Delta t) + \Delta a(\Delta t).$$

На основании приведенного уравнения параболы определяется выражение для приращения выходного сигнала при допущении, что характеристика дрейфует с малым искажением формы, т.е. $a(t) \gg \Delta a(t)$:

$$\Delta P_{\text{СБ}} = P_{\text{СБ}}(U_{\text{СБ}}; t) - P_{\text{СБ}}(U_{\text{СБ}} - \Delta U_{\text{СБ}}; t - \Delta t), \quad (3.8)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{СБ}} = & 2a(t)\Delta U_{\text{ст}}[U_{\text{СБ}} - U_{\text{СБопт}}(t)] - 2a(t)\Delta U_{\text{СБопт}}(\Delta t)[U_{\text{СБ}} - U_{\text{СБопт}}(t)] - \\ & - a(t)[\Delta U_{\text{ст}} - \Delta U_{\text{СБопт}}(\Delta t)]^2 + \Delta P_{\text{СБмакс}}(\Delta t). \end{aligned} \quad (3.9)$$

При заданных условиях дрейфа ($\Delta U_{\text{СБопт}}(\Delta t)$; $\Delta P_{\text{СБмакс}}(\Delta t)$) можно определить соотношение длительностей шагов и значений единичного изменения $\Delta U_{\text{ст}}$, обеспечивающее устойчивую работу ЭШР. Диапазон возможных значений параметра $a(t)$ находится при условии $P_{\text{СБ}}(U_{\text{СБ}}, t) = 0$ и изменении $U_{\text{СБ}}$ от $U_{\text{хх}}$ до $2U_{\text{СБопт}}$.

Таким образом, для контроллера заряда АБ с шаговым экстремальным регулятором мощности СБ, входящим в состав автономной энергетической установки со стандартными фотоэлектрическими панелями с номинальным напряжением 35 В (при температуре 25 °С), определен диапазон поиска экстремума мощности в зависимости от температуры и освещенности СБ, равный 30 В. При использовании цифровой системы управления и шаге экстремального регулятора от 0,5 до 1 В энергетическая эффективность устройства составляет более 98% от максимально возможной мощности СБ. При изменяющейся ВАХ во время нестабильных внешних условий система должна показывать стабильную и

эффективную работу, осуществляя поиск экстремума в двухшаговом и одношаговом режимах.

Выводы по главе 3

1. Понижающий преобразователь постоянного напряжения наиболее просто согласуется с системами экстремального регулирования мощности солнечных батарей путем регулирования скважности работы силовых ключей и при стандартных ВАХ наиболее оптимален для применения в контроллерах заряда АФЭУ с ЭРМ СБ.

2. Система экстремального регулирования на основе способа вычисления производной способна определить экстремум в быстро изменяющихся условиях, но может работать хаотично и создавать значительные колебания мощности. Также по сравнению с шаговым способом увеличивается время вычислений из-за усложнения алгоритма, которое приводит к снижению частоты дискретизации, и дополнительным потерям энергии солнечных батарей.

3. Шаговый способ поиска экстремума обеспечивает устойчивое регулирование максимума мощности солнечной батареи и коэффициент ее использования не менее 98% в любых изменяющихся условиях эксплуатации СБ. При колебаниях выходной мощности фотопреобразователей во время работы системы потеря мощности незначительная.

4. Для контроллера заряда АБ с шаговым экстремальным регулятором мощности СБ определен диапазон поиска экстремума мощности в зависимости от температуры и освещенности СБ, равный 30В. При использовании цифровой системы управления и шаге экстремального регулятора от 0,5 до 2 В энергетическая эффективность устройства составляет более 98% от максимально возможной мощности СБ. При изменяющейся ВАХ во время нестабильных внешних условий система должна показывать стабильную и эффективную работу, осуществляя поиск экстремума в двухшаговом и одношаговом режимах.

5. В среде MatLab Simulink разработана имитационная модель автономной фотоэлектрической энергетической установки, состоящая из солнечной и аккумуляторной батарей, контроллера заряда с функцией экстремального регулирования мощности СБ и нагрузки. Данная модель адекватно отображает логику работы АФЭУ, что позволяет использовать ее при проектировании энергетических установок.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ШАГОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

В главе приводятся результаты разработки автономной фотоэлектрической энергетической установки АФЭУ-0,5 с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей, а также разработки контроллера заряда с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей. Представлены результаты экспериментальных исследований энергетической эффективности АФЭУ-0,5, и их сравнение с результатами моделирования.

4.1 Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей

Результаты диссертационных исследований были использованы при разработке научно-исследовательской автономной фотоэлектрической энергетической установки (АФЭУ-0,5) с реализацией режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей. АФЭУ-0,5 построена на основе структурной схемы, представленной на рисунке 4.1, где приняты следующие обозначения: СБ – солнечная батарея; КНС – контроллер наведения на Солнце; ДШД1, ДШД2 – драйверы управления шаговыми двигателями; ДПС 1, ДПС2 – датчики положения Солнца по азимуту и углу места; КВ 1 - КВ 4 – конечные выключатели, М1, М2 – шаговые двигатели; Р1 – Р4 – редукторы; КЗАБ – контроллер заряда аккумуляторных батарей; И – инвертор; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи.

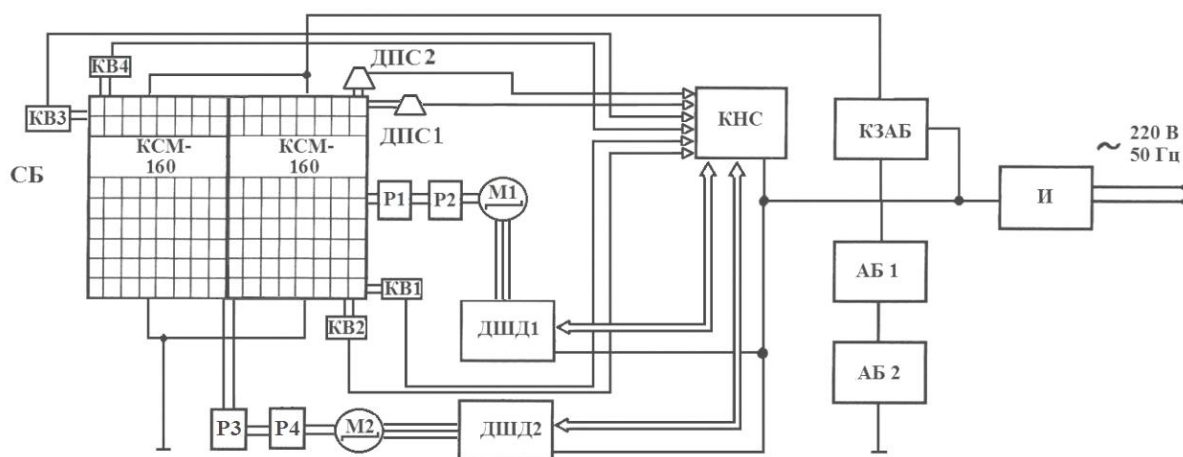


Рисунок 4.1 – Функциональная схема АФЭУ-0,5

По приведенной схеме (рисунок 4.1) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники изготовлена и испытана научно-исследовательская автономная фотоэлектрическая энергетическая установка АФЭУ-0,5 состоящая из электромеханической части; контроллера заряда АБ с экстремальным шаговым регулятором мощности СБ; двух СБ – КСМ-160; двух АБ – TUDORT12V155FT; контроллера наведения фотоэлектрических панелей на Солнце; драйверов управления шаговыми двигателями (DM356M); инвертора TS 1500-224.

Фотография электромеханической части энергетической установки приведена на рисунке 4.2, которая состоит из рамы с двумя фотоэлектрическими модулями КСМ-160; подвижного металлического каркаса; неподвижного металлического каркаса; редуктора поворота по углу места; редуктора поворота по азимуту; двух шаговых двигателей типа ШД-5Д; двух датчиков положения Солнца [62].



Рисунок 4.2 – Электромеханическая часть энергетической установки АФЭУ-0,5 с двумя фотоэлектрическими панелями КСМ-160

Аккумуляторная батарея состоит из двух последовательно соединенных аккумуляторов «TUDORT12V 155FT» по 12 В каждая. Внешний вид аккумуляторных батарей, использованных в АФЭУ – 0,5, представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Внешний вид аккумуляторных батарей TUDORT12V 155FT

Краткие параметры:

- технология производства – AGM;
- срок службы 3-5 лет;
- напряжение = 12 В;
- емкость = 159 Ач;
- длина = 560 мм;
- ширина = 125 мм;
- высота = 290 мм;
- вес нетто = 55,4 кг.

Фотография внешнего вида инвертора тока TS 1500-224 представлена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Внешний вид инвертора тока TS 1500-224

Основные характеристики:

- выходная мощность – 1,5 кВт;
- входное напряжение DC – 24 В;
- выходное напряжение AC – 230 В;
- форма выходного напряжения – чистый синус;
- размер – 420×220×88 мм.

4.2 Разработка контроллера заряда с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей

Функциональная схема разработанного и изготовленного контроллера заряда аккумуляторных батарей приведена на рисунке 4.5, где приняты следующие обозначения: СБ1, СБ2 – фотоэлектрические модули КСМ-160; МК – микроконтроллер ATmega 128; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи Tudor 12В, 155 Ач; ДТ_{СБ}, ДТ_{АБ} – датчики тока Lemlv25-р; ДН_{СБ}, ДН_{АБ} – датчики напряжения Lemla25-пр. В разработанном контроллере применена силовая схема на основе понижающего преобразователя напряжения [14].

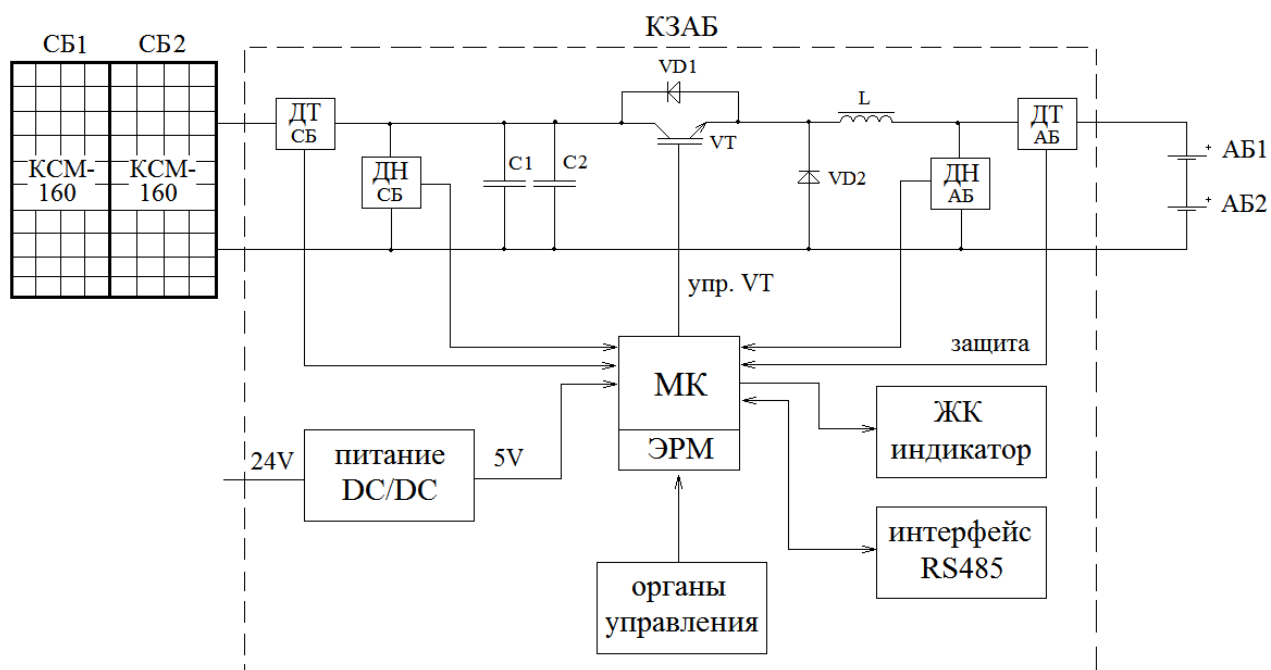


Рисунок 4.5 – Функциональная схема КЗАБ с реализацией функции экстремального регулирования мощности СБ

В контроллере предусмотрено два режима работы, изменяемых вручную положением галетного переключателя. Первый режим – стабилизации напряжения СБ на заданном уровне, в котором пользователь в ручном режиме может задать нужную рабочую точку ВАХ СБ. Второй режим – ЭШР, в этом режиме происходит автоматический поиск точки ВАХ с максимальной выходной мощностью. Контроллер заряда АБ производит регулирование напряжения в оптимальной

точке по шаговому способу поиска экстремума. Алгоритм работы КЗАБ приведен на рисунке 4.6.

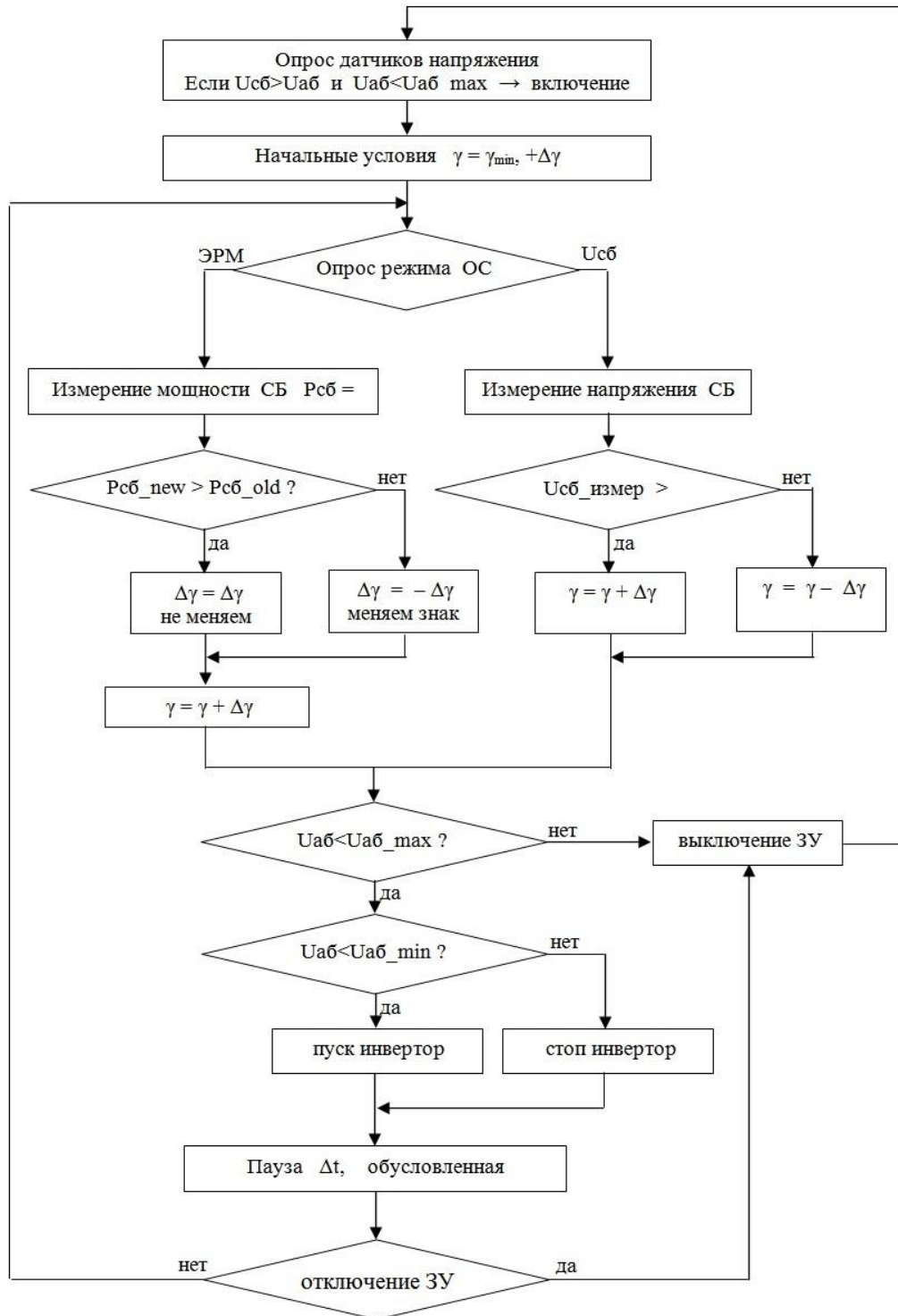


Рисунок 4.6 – Структурная схема алгоритма функционирования КЗАБ выполняющего функцию заряда АБ и ЭШР СБ

Прежде всего, производится опрос датчиков напряжения АБ и СБ. Флаг разрешения запуска контроллера устанавливается только в том случае, если напряжение холостого хода СБ превышает напряжение АБ, в противном случае включение контроллера не имеет смысла. Другим условием запуска является неполный заряд АБ, что определяется по напряжению АБ, которое не должно превышать определенного значения. Следующим действием задаются начальные условия работы контроллера, устанавливается относительная длительность импульсов управления $\gamma_{\min}$ и положительный текущий знак приращения $+\Delta\gamma$. Далее производится опрос переключателя режима обратной связи: если переключатель находится в положении «ЭРМ», то контроллер работает в режиме автоматического поиска экстремума, если в положении $U_{\text{СБ}}$ – ручного поиска.

В режиме стабилизации напряжения контроллер стабилизирует напряжение СБ на уровне, заданном пользователем. Достигается это применением интегрирующего закона управления, т.е. итерационной пошаговой подстройки, что реализуется следующим образом: текущее значение напряжения СБ сравнивается с его опорным стабилизируемым значением $U_{\text{оп}}$. Если $U_{\text{СБ}}$ больше, то γ уменьшается, если меньше, γ увеличивается на постоянную величину $\Delta\gamma$, определяющую точность и быстродействие системы, в данном случае обратно пропорциональных друг другу. Применение такого закона управления стало возможным ввиду инерционности изменения как параметров СБ, так и нагрузки. Для стабильности работы системы в контур обратной связи вводится зона нечувствительности. Этот режим предназначен для проведения отладочных мероприятий или применяется при возникновении нештатных ситуаций.

При работе контроллера в режиме ЭШР опрашиваются датчики тока и напряжения СБ, рассчитывается выходная мощность СБ. На основании измеренного значения мощности определяется управляющее воздействие. Процесс захвата точки экстремума мощности показан на рисунке 4.7.

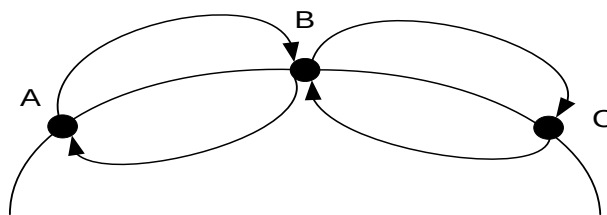


Рисунок 4.7 – Диаграмма перемещения рабочей точки по вольт-ваттной характеристике в процессе захвата точки экстремума мощности

Предположим, что рабочая точка ВВХ, находящаяся в точке А, движется вверх к максимуму мощности. В точке А рассчитывается соответствующая ей мощность. Далее ЭШР перемещает рабочую точку в том же направлении - в точку В. Мощность точки В больше мощности точки А, поэтому рабочая точка продолжает сдвигаться в прежнем направлении. После перехода в точку С с меньшей мощностью происходит смена знака приращения напряжения СБ и алгоритм перемещает рабочую точку в В. При следующем шаге и сравнении значений мощности точек В и С дает положительное изменение мощности СБ. Соответственно рабочая точка перемещается в прежнем направлении, т.е. попадает в точку А, где изменение мощности относительно точки В отрицательное, система снова меняет знак движения рабочей точки, которая попадает в точку В. Далее движение рабочей точки повторяется по описанной траектории [8].

Другой важной функцией контроллера является управление инвертором и включением-выключением режима заряда АБ, для этого в алгоритме присутствует постоянный контроль напряжения на АБ. Выключение инвертора происходит по условию достижения напряжением АБ допустимого минимума, что говорит о предельном разряде АБ и недопустимости питания нагрузки, оставшаяся энергия АБ расходуется на питание узлов управления и поддержания контроллера в рабочем состоянии.

Для защиты АБ от перезаряда производится сравнение напряжения АБ с его максимальным допустимым значением. Если напряжение на АБ возросло до максимума (28 В) или выше, подача энергии через контроллер прекращается за счет запираания силового транзистора.

Для визуализации текущих параметров применен жидкокристаллический модуль МТ-20S4М, состоящий из контроллера управления и ЖК панели. Модуль отображает 4 строки по 20 символов в матрице 5х8 точек, между символами имеется интервал шириной в одну точку.

На передней панели находится переключатель, определяющий режим работы контроллера, ЭРМ – автоматический поиск максимума мощности или $U_{СБ}$ – ручной режим. Также рядом расположен регулятор, с помощью которого производится подстройка напряжения СБ в ручном режиме.

Микропроцессорная система управления контроллером заряда конструктивно представляет печатную плату, содержащую микроконтроллер Atmega128, датчики входных и выходных параметров контроллера заряда, вторичный источник питания. Часть элементов силовой части контроллера заряда также располагается на печатной плате системы управления, что позволяет минимизировать паразитную индуктивность цепей управления.

На рисунке 4.8 представлена фотография изготовленного экспериментального образца контроллера заряда АБ с функцией экстремального регулирования мощности СБ.



Рисунок 4.8 – Контроллера заряда с ЭРМ СБ

Далее приведено краткое описание и визуальное отображение функций во время работы контроллера заряда аккумуляторных батарей.

После нажатия кнопки «Пуск» запускается основная программа микроконтроллера. Производится опрос датчиков напряжения СБ и АБ. После проверки датчиков на отсутствие запрещающих работу сигналов разрешается работа инвертора. При обнаружении указанных сигналов соответствующая информация выводится на дисплей.

При нажатии кнопки «Стоп» контроллер останавливает все преобразования, завершает текущие процедуры приема/передачи данных, запрещается работа инвертора и силового транзистора. Работа основной программы завершается, и контроллер переходит в режим максимального энергосбережения.

Система снабжена защитой по току нагрузки и по входному току контроллера. При превышении током предельно допустимых значений контроллер формирует сигнал отключения инвертора. При появлении сигнала от одного из датчиков работа инвертора запрещается и на дисплей выводится информация о неисправности. После устранения неисправности работа инвертора разрешается.

При включении автоматического выключателя, соединяющего АБ с контроллером на дисплее, отображается надпись «Питание включено» (рисунок 4.9), что говорит об успешной инициализации и тестах узлов управления.

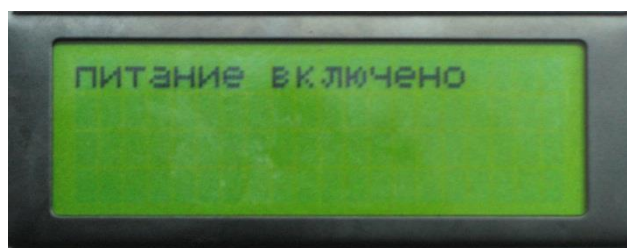


Рисунок 4.9 – «Питание включено»

При включении автоматического выключателя, соединяющего СБ с контроллером, загорается светодиод «Источник».

Для запуска контроллера необходимо нажать кнопку «Пуск», после чего контроллер начнет тестирование параметров источников питания АФЭУ.

Производится проверка напряжения СБ. Если напряжение на СБ меньше напряжения АБ, на индикаторе отобразится надпись «Недостаточное напряжение солнечной батареи» (рисунок 4.10).

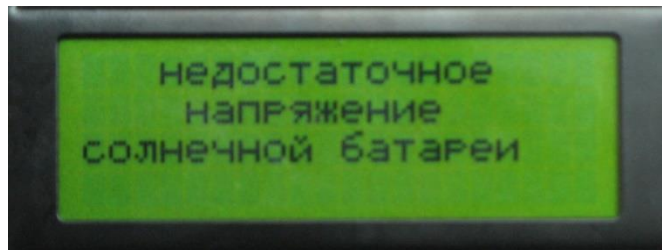


Рисунок 4.10 – «Недостаточное напряжение солнечной батареи»

Производится проверка напряжения АБ, если напряжение на АБ превышает максимально допустимое, на индикаторе отобразится надпись «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим» (рисунок 4.11).

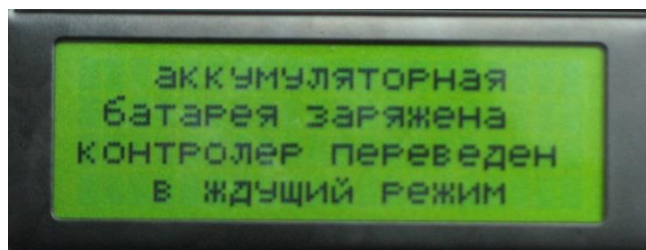


Рисунок 4.11 – «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим»

В ждущем режиме продолжается контроль напряжения, и как только напряжение снизится до 26 В, начнется процесс заряда.

В процессе работы отображаются текущие параметры источников питания и режим работы АБ. Режим заряда отображается символом «АБ↑», а режим разряда символом «АБ↓».

Формат отображения информации (рисунок 4.12):

1-я строка: текущие ток и напряжение СБ;

2-я строка: выходные параметры АБ, состояние АБ (заряд, разряд);

3-я строка: состояние АБ (заряд, разряд), параметры инвертора;

4-я строка: статус контроллера, наличие сработавших аварийных защит.

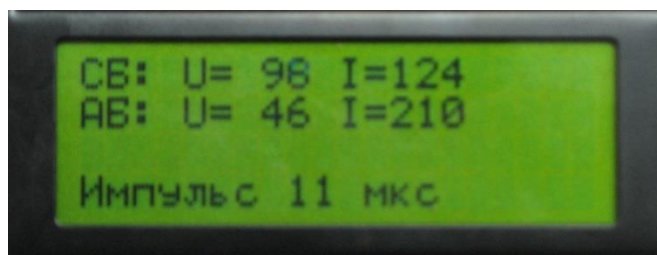


Рисунок 4.12 – Текущие параметры источников питания и режим работы АБ

В процессе работы производится непрерывный мониторинг напряжения на АБ, при превышении напряжения на АБ допустимого значения 28 В процесс заряда прекращается путем принудительного выключения контроллера, что сопровождается выводом сообщения «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим» (рисунок 4.13).

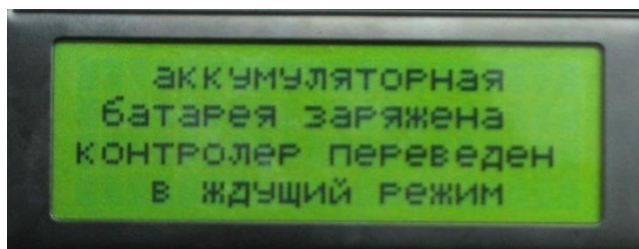


Рисунок 4.13 – «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим»

После прекращения заряда продолжается контроль напряжения, как только напряжение снизится до 26 В, процесс заряда возобновится.

При разряде АБ до напряжения 22 В происходит принудительное отключение нагрузки, и вся энергия СБ используется для заряда АБ, при этом выводится сообщение «АБ разряжена, нагрузка отключена». При заряде АБ до 24 В контроллер снова подключает нагрузку (рисунок 4.14).

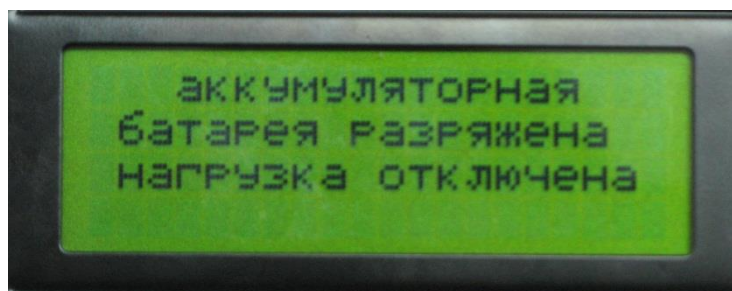


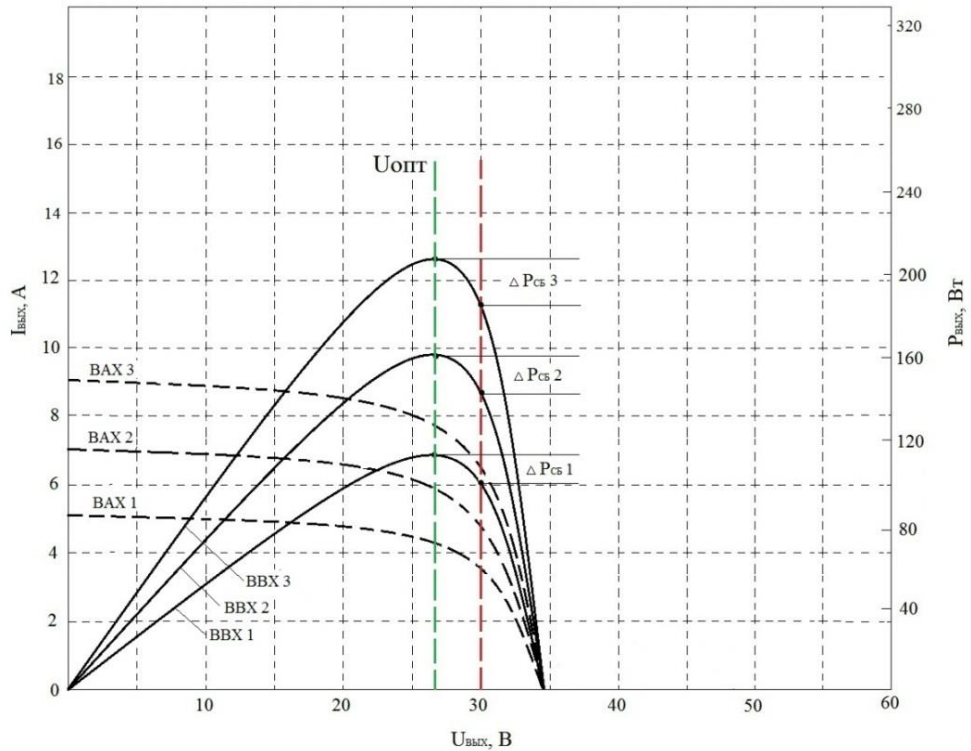
Рисунок 4.14 – «АБ разряжена, нагрузка отключена»

4.3 Экспериментальные исследования энергетической эффективности АФЭУ-0,5

Ниже представлены результаты, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований энергетической эффективности использования солнечной батареи при стабилизации напряжения на СБ, равном 30 В. Такое значение уровня стабилизации напряжения на СБ соответствует оптимальному напряжению нагретых до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ фотоэлектрических модулей КСМ-160 (реальный режим работы фотоэлектрических модулей в летнее время).

Испытания проводились с использованием имитатора солнечной батареи ИБС-200/7-4. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи изменялась в диапазоне $I_{\text{ххСБ}} = 1\text{А}-10\text{А}$; $U_{\text{ххСБ}} = 34\text{В} - 50\text{В}$. Испытания проводились при разряженной ($U_{\text{АБ}} = 23 - 24,5\text{ В}$) и заряженной ($U_{\text{АБ}} = 25 - 27\text{ В}$) аккумуляторной батарее.

На рисунке 4.15 приведены три вольт-амперных и вольт-ваттных характеристики солнечной батареи (1. $U_{\text{хх}} = 34\text{В}$; $I_{\text{кз}} = 5\text{А}$; 2. $U_{\text{хх}} = 34\text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 7\text{А}$; 3. $U_{\text{хх}} = 34\text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 9\text{А}$) с напряжением оптимальной точки менее стабилизируемого напряжения $U_{\text{СБ}} = 30\text{ В}$. Отмечены уровни генерируемых мощностей при напряжении $U_{\text{СБ}} = 30\text{ В}$, а также графически показаны значения недоиспользования СБ по мощности при отклонении оптимальных значений мощности СБ от значений при стабилизации напряжения в 30 В ($\Delta P_{\text{СБ1}}$, $\Delta P_{\text{СБ2}}$, $\Delta P_{\text{СБ3}}$).

Рисунок 4.15 – ВАХ и ВВХ с $U_{\text{опт}} < 30\text{В}$

Из анализа графиков следует, что недоиспользование СБ по мощности в этом случае существенно зависит от тока короткого замыкания солнечной батареи и составляет для СБ 1 - 8%, СБ 2 - 14%, СБ 3 - 25%.

В таблице 4.1 приведены значения коэффициента использования по мощности солнечных батарей для ВВХ, рассмотренных выше.

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от оптимального напряжения рабочей точки ВАХ при стабилизации напряжения

Солнечная батарея	ВАХ		$K_p, \%$
	$U_{\text{опт}}, \text{В}$	$I_{\text{опт}}, \text{А}$	
СБ 1	27,2	4,3	92
СБ 2	27,2	6,02	86
СБ 3	27,2	7,74	75

На рисунке 4.16 приведены вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи (1. $U_{xx} = 38 \text{ В}$, $I_{k3} = 5 \text{ А}$; 2. $U_{xx} = 38 \text{ В}$, $I_{k3} = 7 \text{ А}$; 3. $U_{xx} = 38 \text{ В}$, $I_{k3} = 9 \text{ А}$) с напряжением оптимальной точки, совпадающим с стабилизируемым напряжением $U_{CB} = 30 \text{ В}$. Данный режим работы соответствует оптимальному напряжению нагретых до $+50^\circ \text{C}$ фотоэлектрических модулей КСМ-160.

Из анализа графиков следует, что в этом случае недоиспользования СБ по мощности практически нет, солнечная батарея генерирует максимально возможное значение энергии, $K_p = 98\text{-}100\%$.

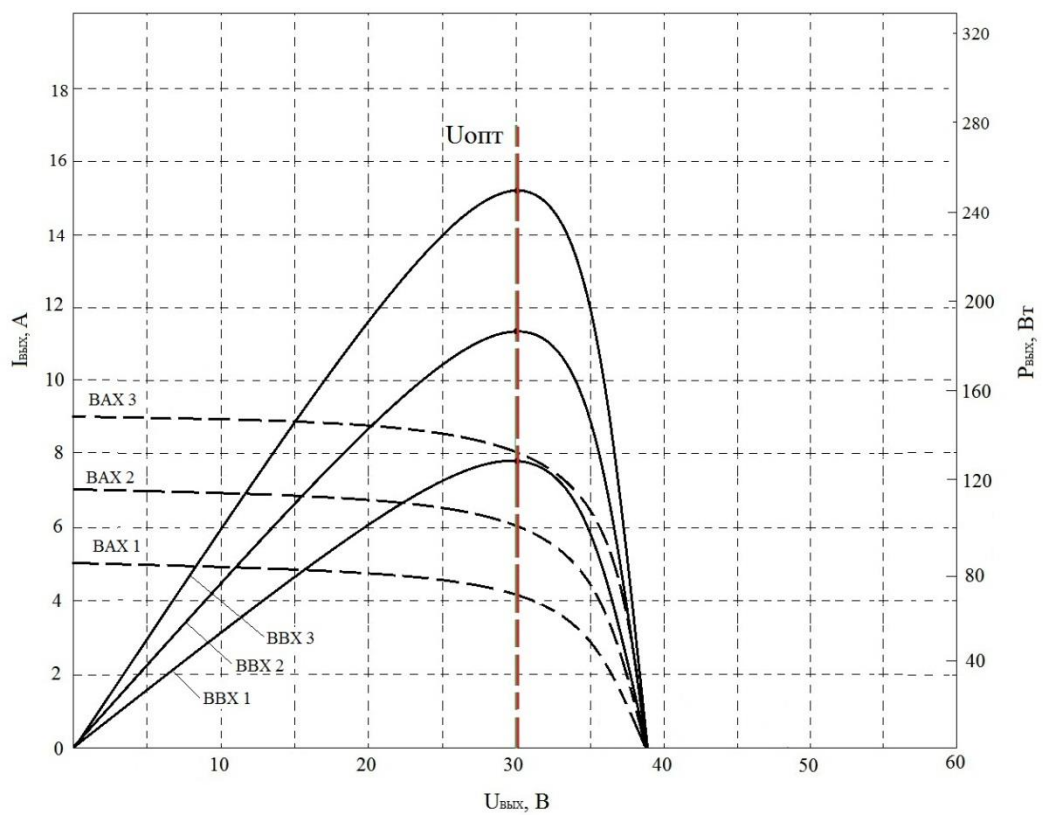


Рисунок 4.16 – ВАХ и ВВХ с $U_{опт} = 30 \text{ В}$

На рисунке 4.17 приведены вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи (1. $U_{xx} = 44 \text{ В}$, $I_{k3} = 5 \text{ А}$; 2. $U_{xx} = 44 \text{ В}$, $I_{k3} = 7 \text{ А}$; 3. $U_{xx} = 44 \text{ В}$, $I_{k3} = 9 \text{ А}$) с напряжением оптимальной точки больше стабилизируемого напряжения $U_{CB} = 30 \text{ В}$.

Этот режим работы соответствует работе фотоэлектрических модулей КСМ–160 при температуре около $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такой режим работы возможен достаточно часто в весенне-летний период.

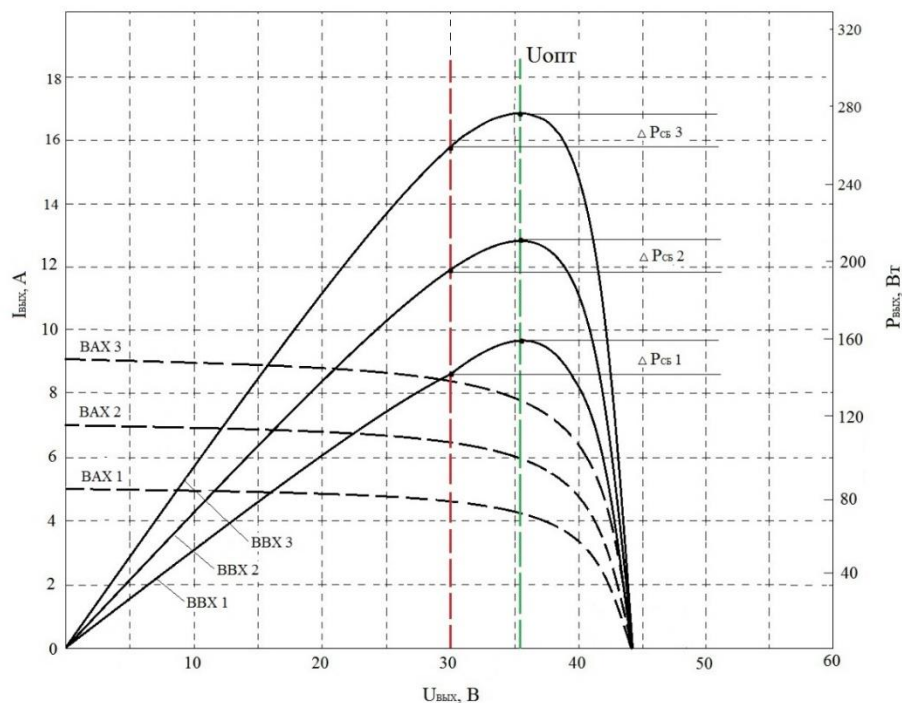


Рисунок 4.17 – ВАХ и ВВХ с $U_{\text{опт}} > 30\text{ В}$

Из анализа графиков следует, что в этом случае солнечная батарея недоиспользуется по мощности приблизительно одинаково для каждой ВВХ – на 7-8 %, $K_p = 92\text{--}93\%$.

Таблица 4.2 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от оптимального напряжения рабочей точки ВАХ при стабилизации напряжения

Солнечная батарея	ВАХ		$K_p, \%$
	$U_{\text{опт}}, \text{В}$	$I_{\text{опт}}, \text{А}$	
СБ 1	35,6	4,4	92
СБ 2	35,6	6,16	93
СБ 3	35,6	7,92	92

На рисунке 4.18 приведены итоговые зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей от напряжения экстремальной точки ВВХ рассмотренных выше характеристик. Зависимости показывают снижение коэффициента использования по мощности солнечных батарей при отклонении $U_{\text{опт}}$ от уровня стабилизируемого напряжения $U_{\text{СБ}} = 30$ В (чем сильнее температура панелей фотоэлектрических модулей КСМ-160 отличается от принятой рабочей температуры $+25$ °С).

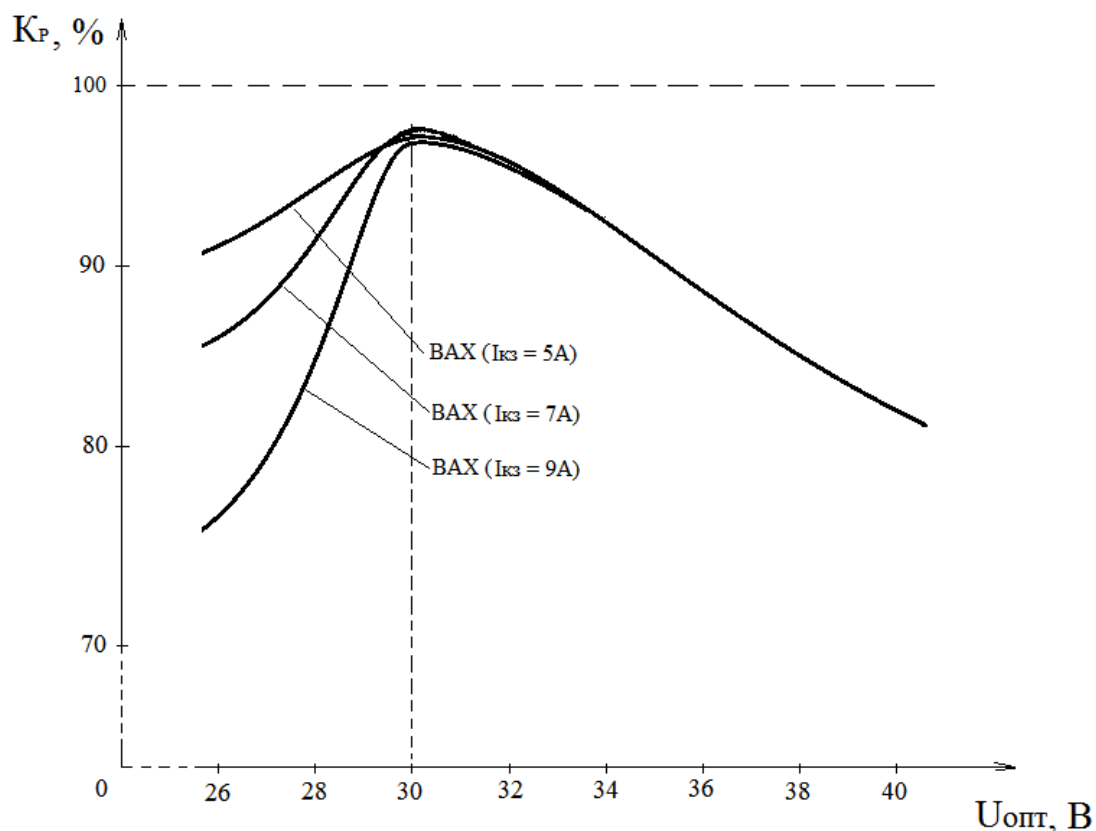


Рисунок 4.18 – Зависимости коэффициента использования по мощности солнечных батарей от напряжения экстремальной точки ВВХ

Далее приведены результаты экспериментальных исследований контроллера заряда, обеспечивающего режим экстремального шагового регулирования мощности СБ. При этом, для проведения экспериментальных работ в режиме стабильной ВАХ использован имитатор солнечных батарей. Параметры заданных ВАХ приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры заданных ВАХ СБ

U_{xx} СБ, В	$I_{кз}$ СБ, А	$U_{опт}$ СБ, В	$I_{опт}$ СБ, А
36	5	28,8	4,3
38	6	30,4	5,22
40	7	32,4	6,09
44	8	35,6	7,04
48	9	39,4	8,01
50	10	41	9

Диаграмма перемещения рабочей точки на ВВХ при регулировании максимума мощности в режиме ЭРМ СБ представлена на рисунке 4.19.

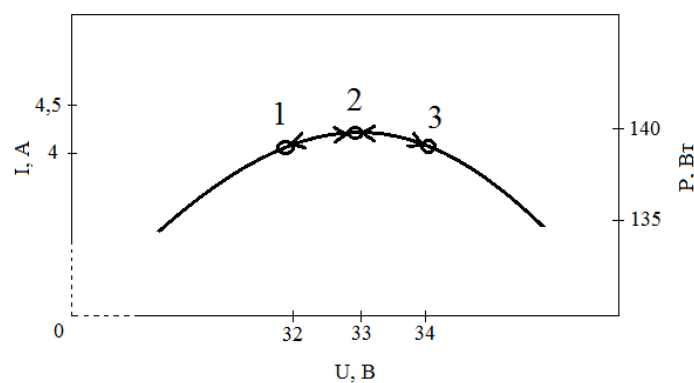


Рисунок 4.19 – Диаграмма перемещения рабочей точки на ВВХ при регулировании максимума мощности в режиме ЭРМ СБ

Установлено, что перемещение рабочей точки СБ в режиме регулирования максимума мощности происходит по трем точкам, что обусловлено заданными параметрами схемы поиска экстремума – частотой изменения напряжения 1 Гц и величиной шага $\Delta U = 1$ В.

В процессе экспериментальных исследований и моделирования контроллера заряда АБ определена средняя мощность СБ в режиме ЭРМ по формуле:

$$P_{CP} = \frac{P_A + 2 \cdot P_B + P_C}{4}, \quad (4.1)$$

где P_A – мощность СБ в точке А;

P_B – мощность СБ в точке В;

P_C – мощность СБ в точке С.

На рисунках 4.20-4.29 представлены диаграммы, полученные при моделировании АФЭУ в среде имитационного моделирования MatLab Simulink при различных значениях величины шага экстремального регулирования и частоте регулирования.

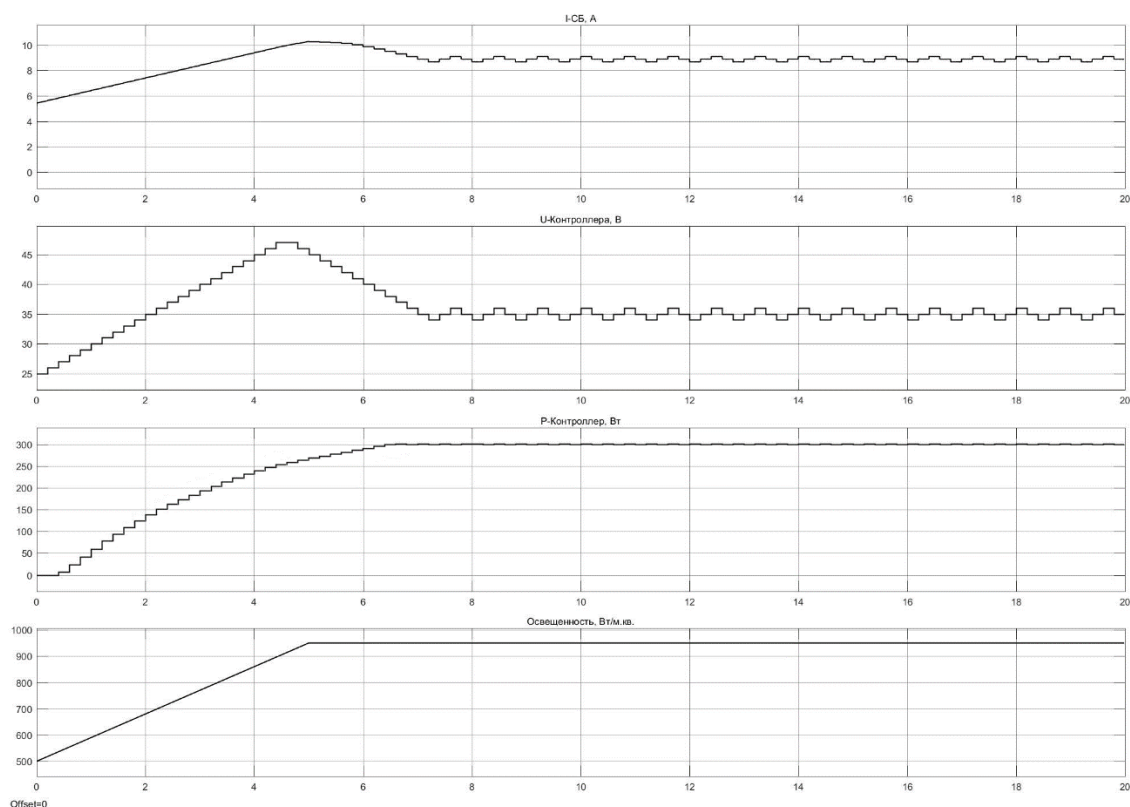


Рисунок 4.20 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 0,5 В, частота шага – 5 Гц)

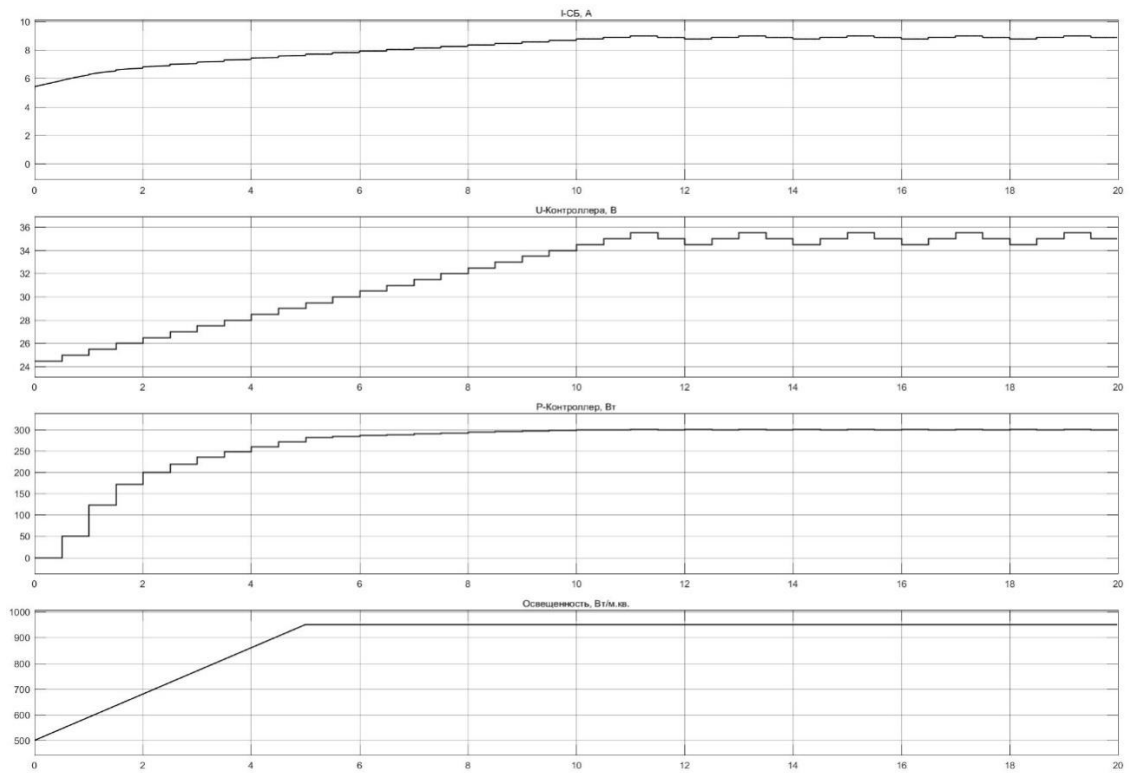


Рисунок 4.21 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 0,5 В, частота шага – 2 Гц)

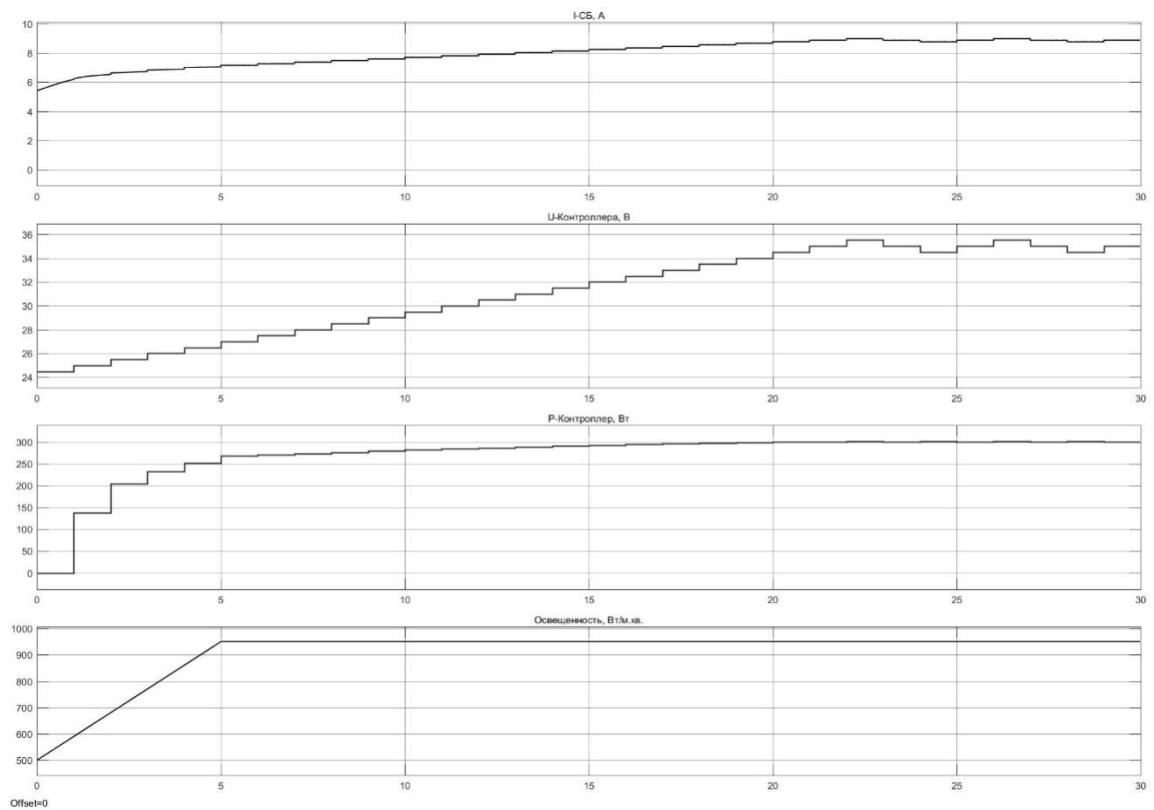


Рисунок 4.22 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 0,5 В, частота шага – 1 Гц)

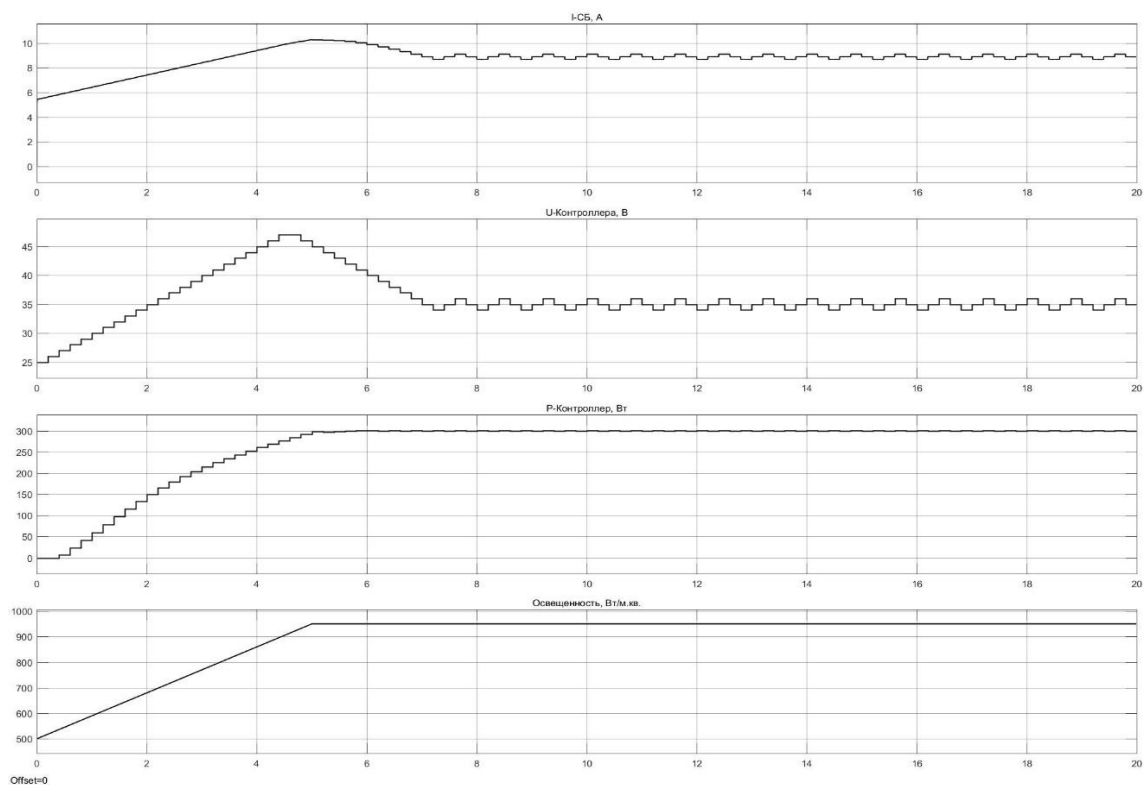


Рисунок 4.23 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 1 В, частота шага – 5 Гц)

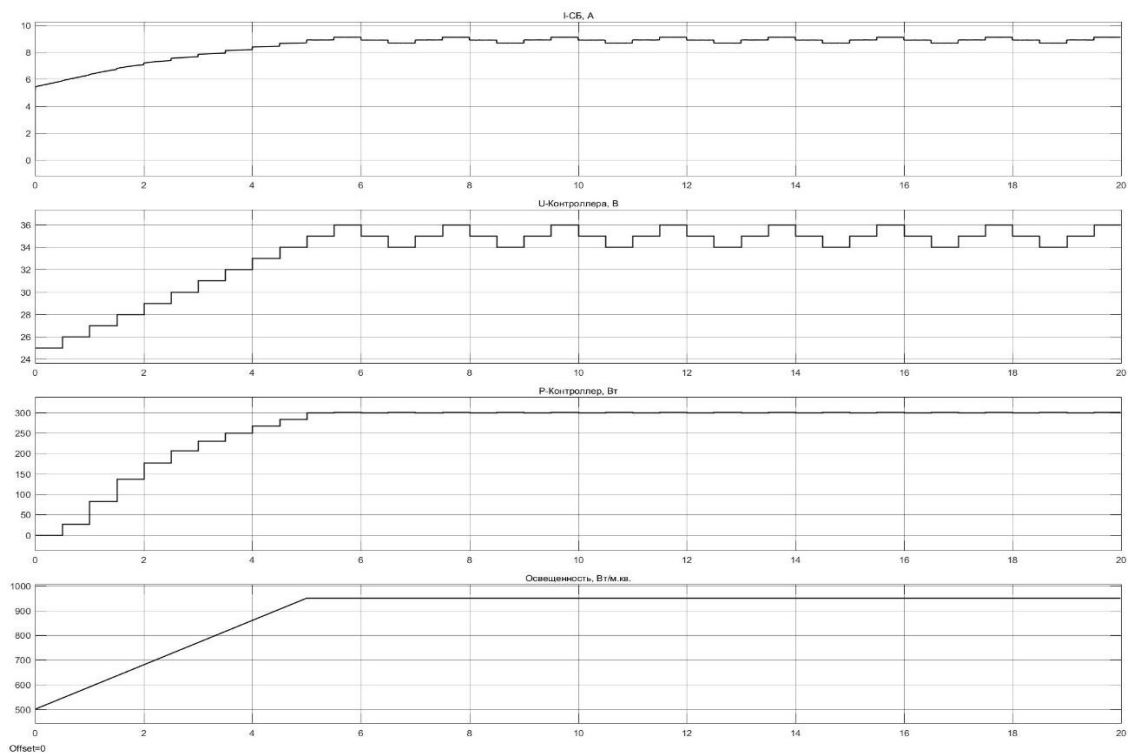


Рисунок 4.24 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 1 В, частота шага – 2 Гц)

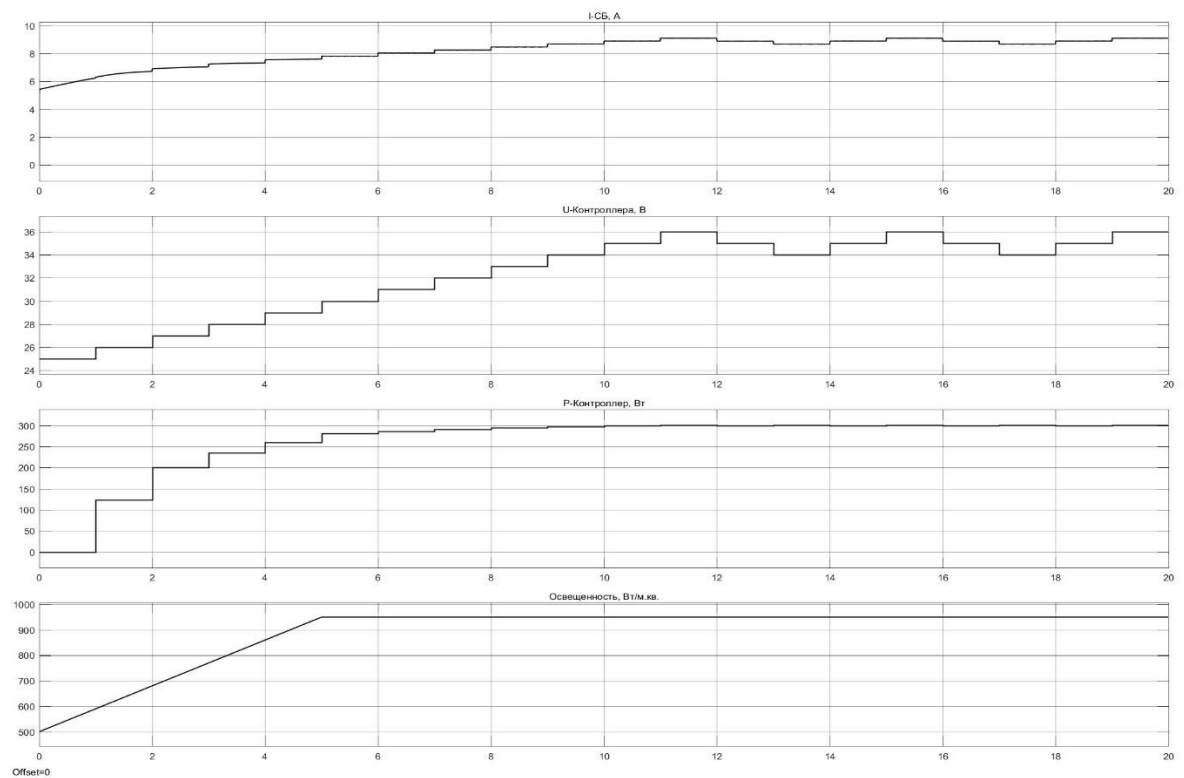


Рисунок 4.25 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 1 В, частота шага – 1 Гц)

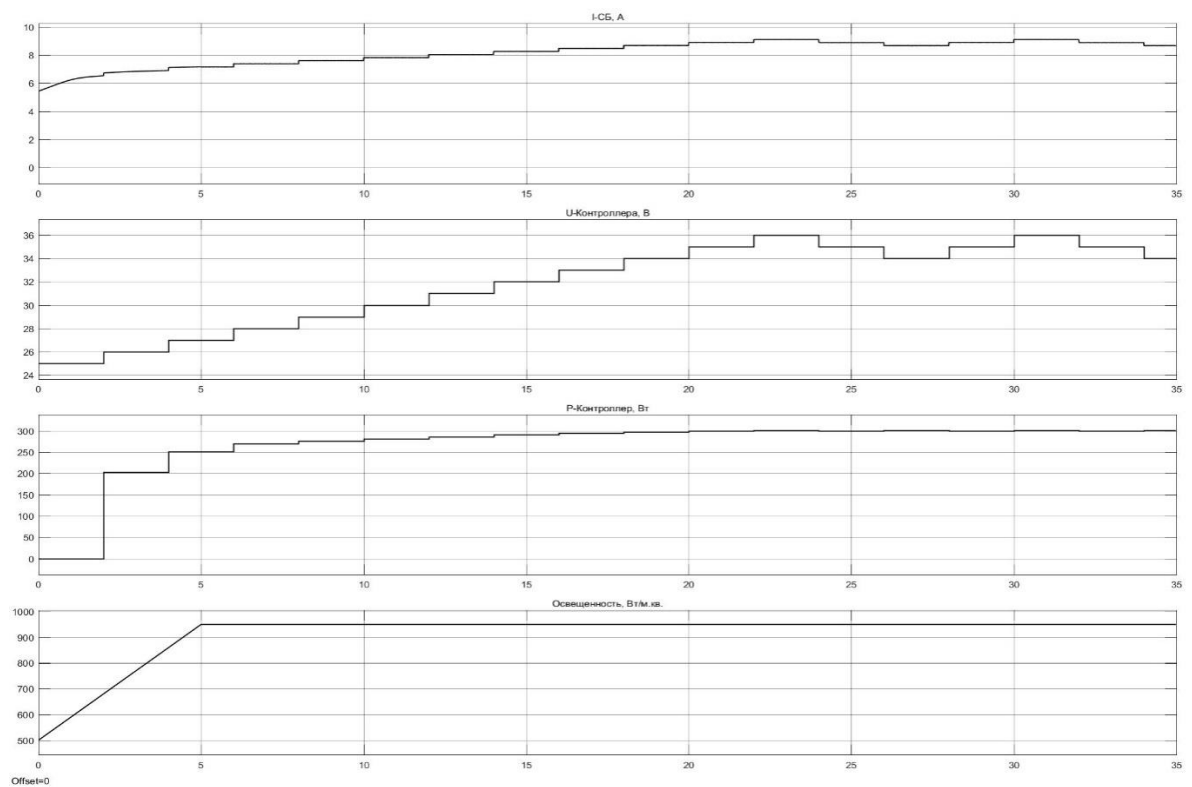


Рисунок 4.26 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 1 В, частота шага – 0,5 Гц)

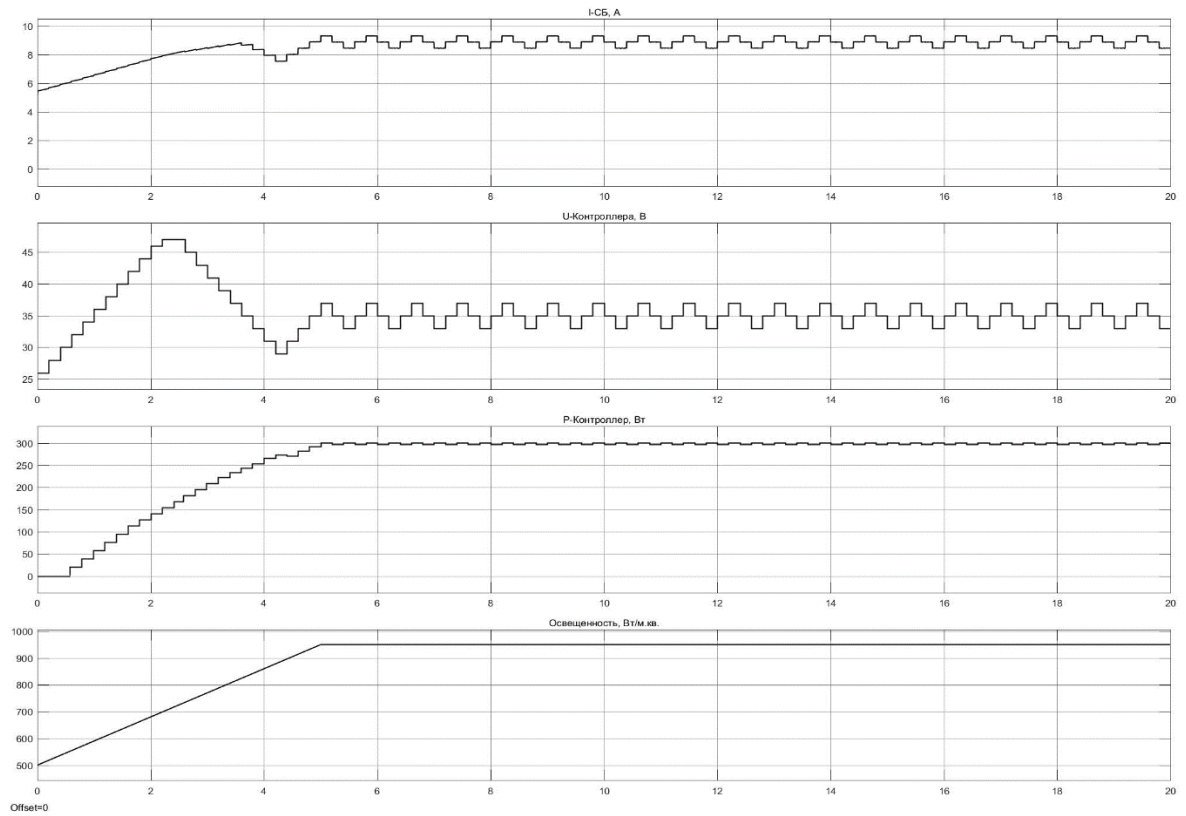


Рисунок 4.27 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 2 В, частота шага – 5 Гц)

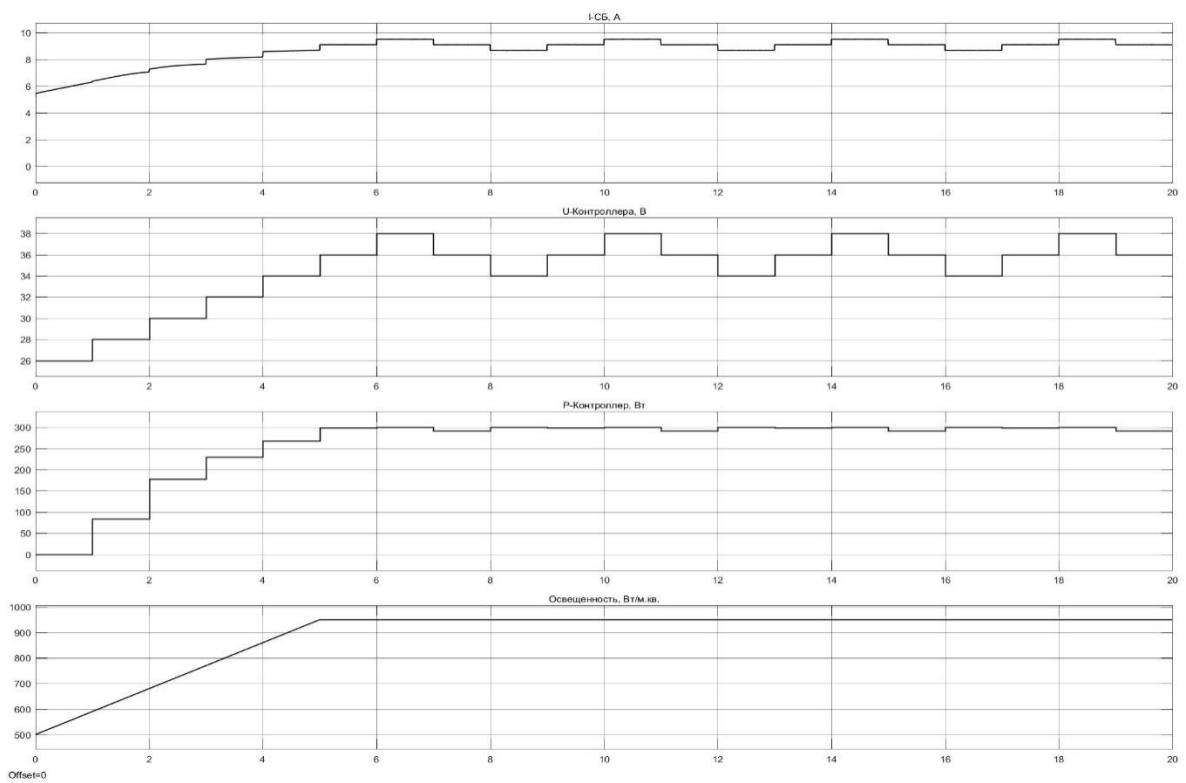


Рисунок 4.28 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 2 В, частота шага – 1 Гц)

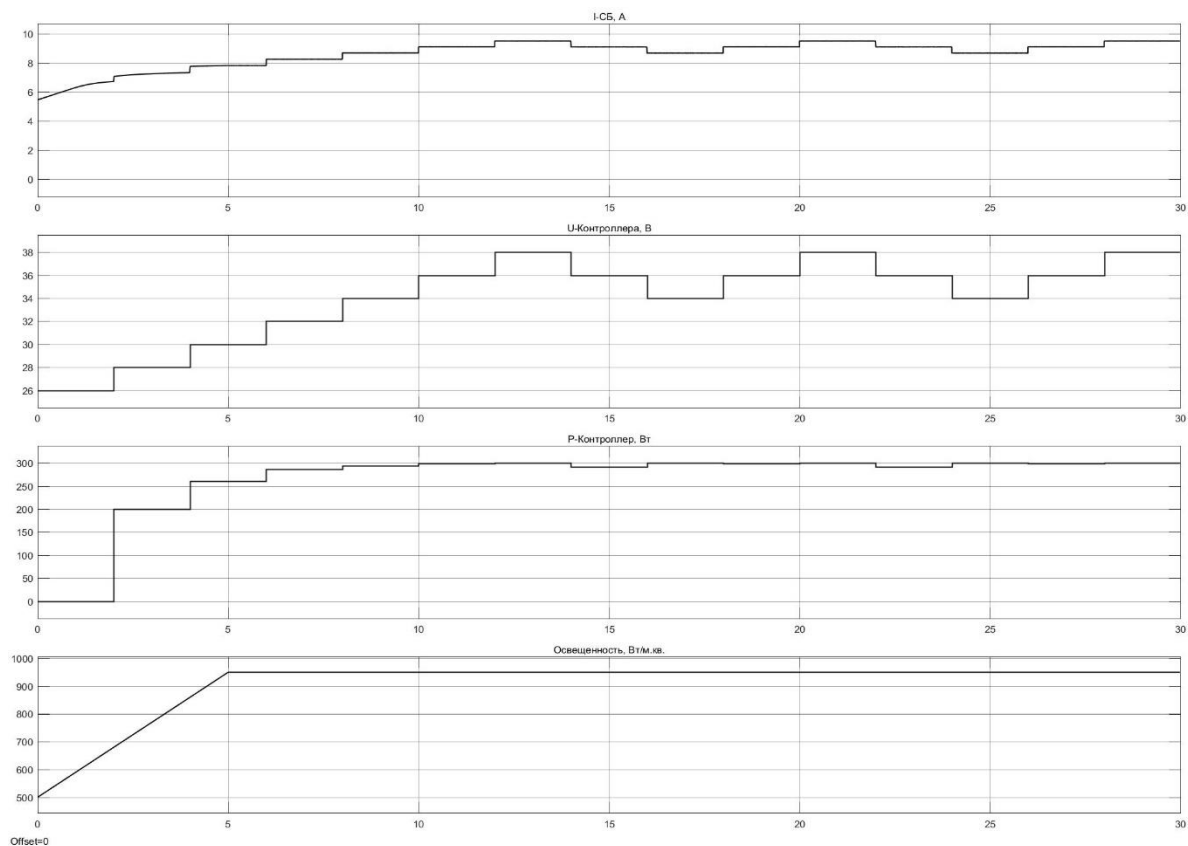


Рисунок 4.29 – Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР
(величина шага – 2 В, частота шага – 0,5 Гц)

Анализ графиков показывает, что ЭШР с величиной шага регулирования напряжения $\Delta U = 1$ В и частотой регулирования 1-2 Гц позволяет достичь значения коэффициента использования СБ по мощности более 98%. В ходе проведения моделирования и экспериментальных исследований получены градиенты измеряемых мощностей, достаточные для устойчивого регулирования максимума мощности по трем точкам.

Варьирование параметров ВАХ, таких как напряжение холостого хода $U_{ХХ}$ и тока короткого замыкания $I_{КЗ}$, не привело к существенному изменению коэффициента использования, сохраняющего свое значение в пределах $K_p = 98-98,5\%$.

Применение экстремального регулирования мощности СБ позволяет существенно улучшить энергетическую эффективность АФЭУ-0.5. В сравнении со схемой соединения силовых шин СБ и АБ при отклонении температуры панелей

фотоэлектрических модулей на ± 40 градусов энергетическая эффективность при ЭРМ СБ увеличивается до 28%.

Также проведены экспериментальные исследования энергетической эффективности режима экстремального регулирования мощности солнечной батареи с реальными СБ (два модуля КСМ-160) и при реальном солнечном освещении. Режим работы установки АФЭУ-0,5ЭРМ:

- угол наклона плоскости СБ к горизонту = 56° ;
- время проведения эксперимента с 10:00 до 17:00;
- установка АФЭУ-0,5ЭРМ сориентирована на Юг.

Результаты экспериментальных исследований сведены в таблицу 4.4. Наблюдается изменение параметров ВАХ, которое могло быть вызвано целым рядом факторов: изменением освещенности СБ вследствие суточного пути Солнца по небесному своду, его затенения, изменением температуры солнечных панелей и т.д.

Таблица 4.4 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от напряжения холостого хода U_{xx} при ЭРМ СБ

t, ч	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
U_{xx} , В	39	39	38	38	39	39	43	42
t_{CB} , $^\circ\text{C}$	45°	45°	50°	55°	50°	50°	40°	40°
$t_{окр.ср.}$, $^\circ\text{C}$	22°	27°	28°	30°	31°	32°	29°	27°
P_{CB} , Вт	138,5	176,3	198,3	225,1	213,1	177	122	86
K_p, %	99	98,7	99	98,9	99,2	98,6	98,5	98,6

Проведенные испытания показали, что параметры экстремального шагового регулирования мощности, составляющие $\Delta U=1$ В и частоту изменения напряжения 1 Гц, обеспечивают компенсацию параметров СБ при дрейфе ВАХ в реальных условиях. Результаты при реальном солнечном освещении практически совпадают

с экспериментальными данными, полученными при использовании имитатора солнечных батарей ИБС - 200/7-4, а также с результатами моделирования.

Экспериментально получены значения выходной мощности СБ от времени суток (рисунок 4.30). Эксперимент проводился при условиях небольшой облачности, в результате чего не получено максимально возможное значение мощности, генерируемое двумя солнечными батареями КСМ-160.

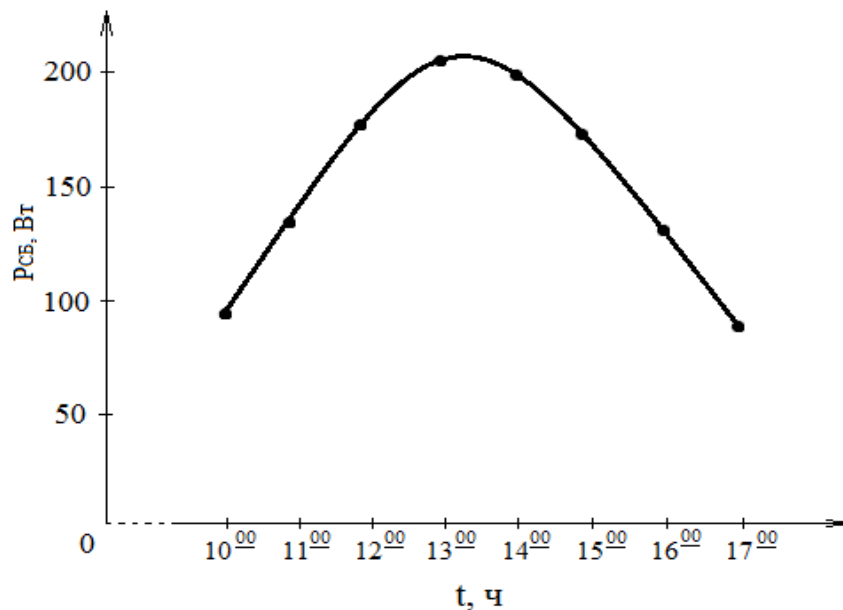


Рисунок 4.30 – Зависимость мощности СБ от времени суток

На рисунке 4.31 приведены обобщенные результаты изменения температуры фотоэлектрических преобразователей от времени суток, полученные в ходе эксперимента.

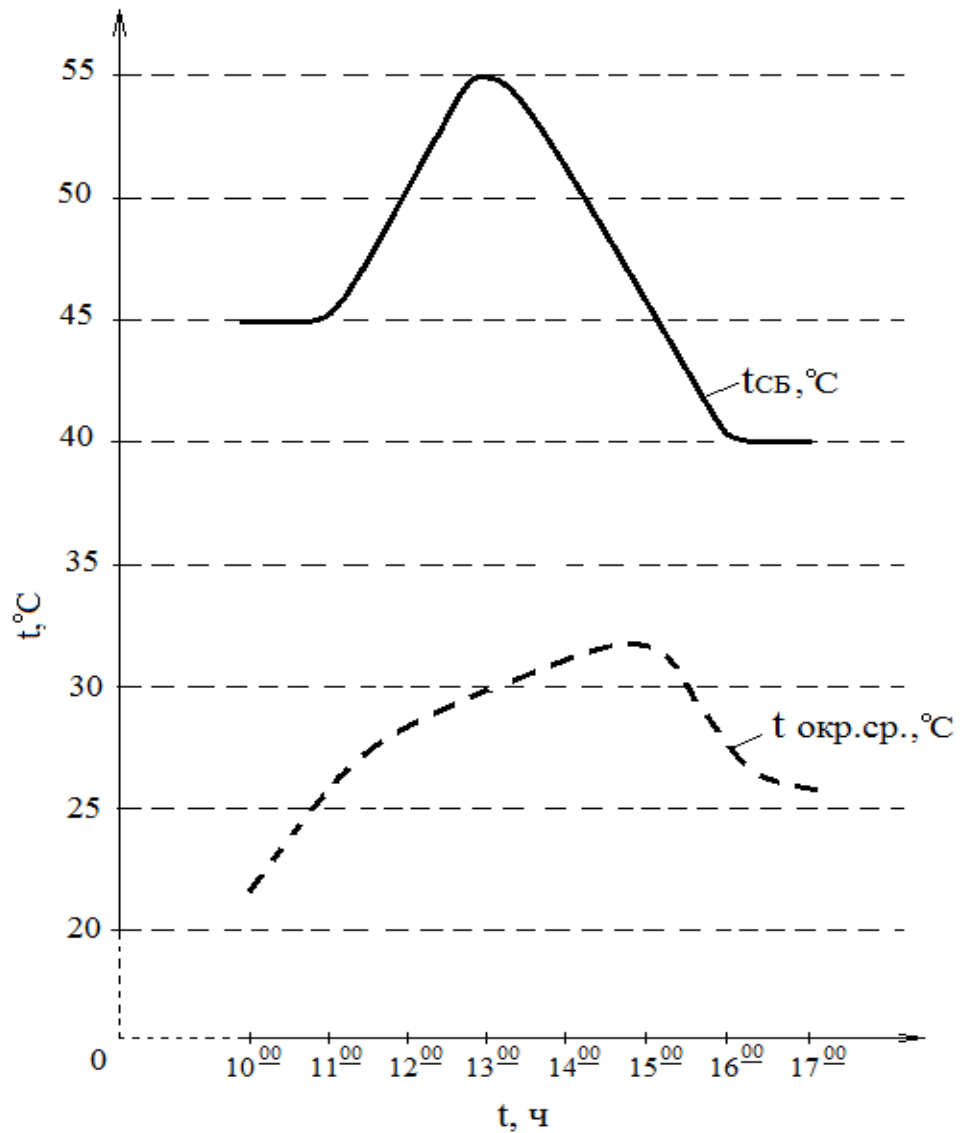


Рисунок 4.31 – Зависимость температуры фотоэлектрических преобразователей от температуры окружающей среды и времени суток

На рисунке 4.32 изображены зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей при стабилизации напряжения рабочей точки СБ и ЭРМ СБ, при реальном солнечном освещении и с использованием ИБС-200/7-4.

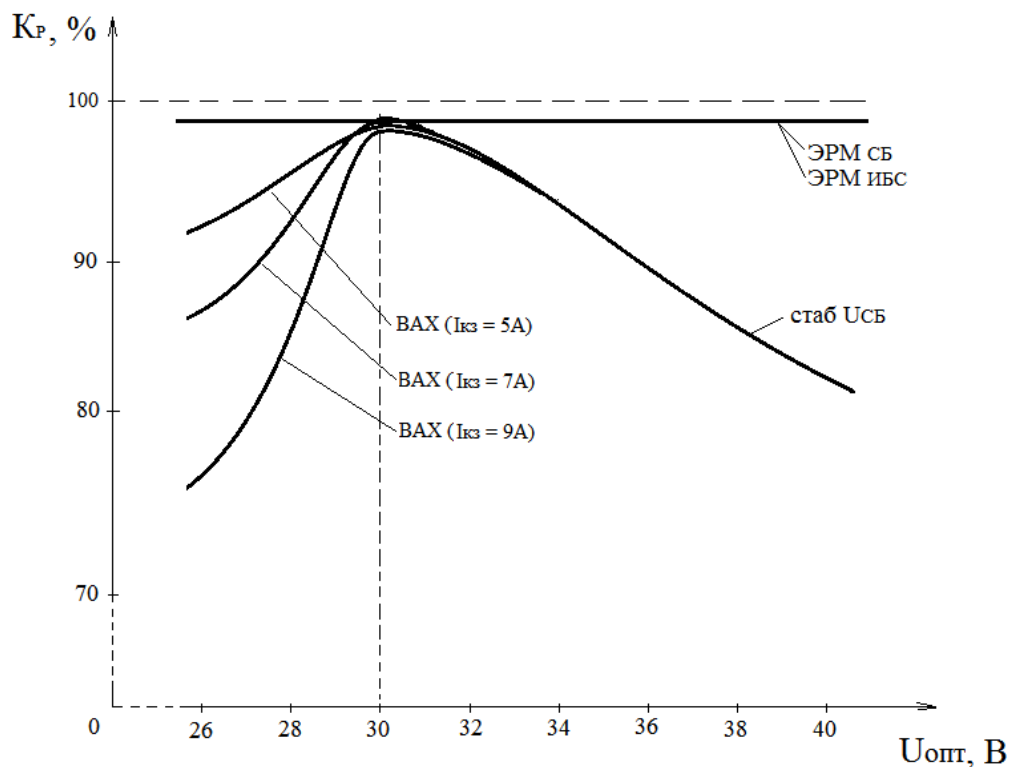


Рисунок 4.32 – Зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей при стабилизации напряжения рабочей точки СБ и ЭРМ СБ

Коэффициент использования при ЭРМ СБ изменяется в пределах $K_p = 98,5 - 99$ %. Это объясняется различием положения точек регулирования УСБ относительно вершины ВВХ.

Прирост мощности солнечной батареи при ЭРМ СБ по сравнению с режимом стабилизации напряжения на уровне 30 В составляет до 28%. Разработанная система поиска экстремума с выбранными параметрами обеспечивает коэффициент использования мощности СБ $K_p \geq 98\%$.

Другим важным экспериментально проверенным параметром является КПД контроллера заряда. По экспериментальным данным построена усредненная зависимость КПД блока заряда от выходной мощности солнечной батареи при разряженной аккумуляторной батарее ($U_{AB} = 23,1 - 24,3В$) и заряженной АБ ($U_{AB} = 25,4 - 27В$), представленная на рисунке 4.33 (в качестве солнечной батареи используется имитатор солнечной батареи ИБС-200/7-4).

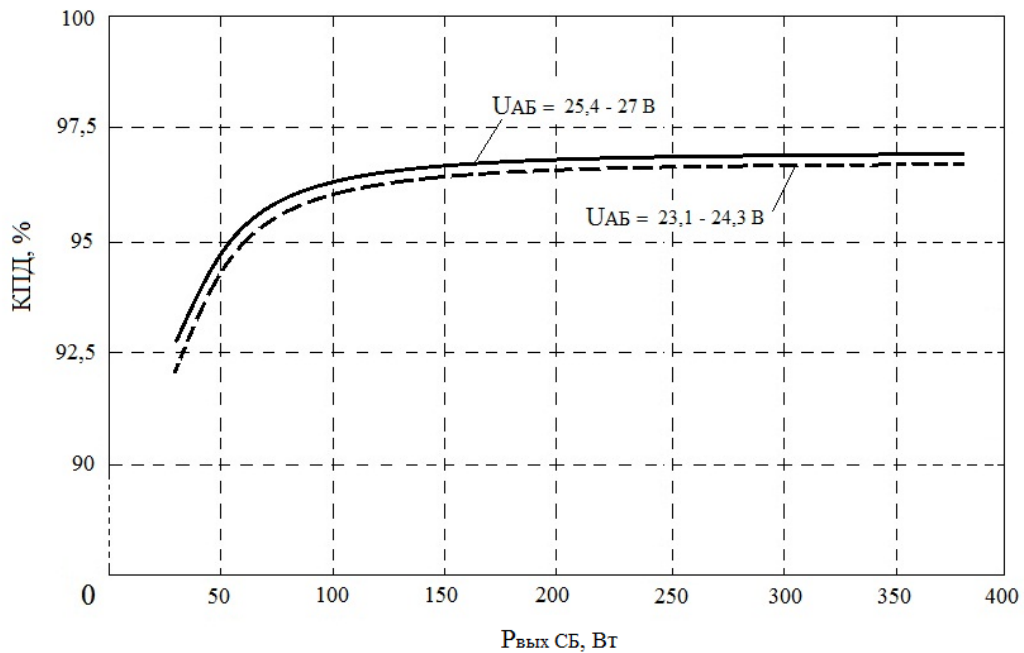


Рисунок 4.33 – Усредненная зависимость КПД блока заряда от $P_{\text{выхСБ}}$ при разряженной АБ ($U_{\text{АБ}} = 23,1 - 24,3 \text{ В}$) и заряженной АБ ($U_{\text{АБ}} = 25,4 - 27 \text{ В}$)

Анализ зависимости показывает рост КПД в диапазоне 92,5% - 96,5% в зависимости от выходной мощности солнечных батарей.

В окончании экспериментов были проверены технические характеристики энергетической установки АФЭУ – 0,5 при стабилизации напряжения на СБ равном 30 В ($U_{\text{СБ}} = 30 \text{ В}$) и изменении мощности нагрузки от 50 до 1000 Вт. Испытания проводились при разряженной ($U_{\text{АБ}} = 22,6 - 24,2 \text{ В}$) и заряженной ($U_{\text{АБ}} = 25,5 - 27 \text{ В}$) аккумуляторной батарее.

Основными исследуемыми параметрами являлись:

- выходное напряжение АФЭУ – 0,5;
- зависимость тока и мощности АБ от мощности нагрузки и параметров ВАХ солнечной батареи.

Выходное напряжение определяется техническими параметрами инвертора А 302-1К7-F3 и соответствует его паспортным данным – $U_{\text{ВЫХ}} = 230 \text{ В} \pm 23 \text{ В}$.

На рисунке 4.34 показаны потоки мощности между солнечной, аккумуляторной батареями и нагрузкой при разряженной ($U_{\text{АБ}} = 22,6 - 24,2 \text{ В}$) и заряженной ($U_{\text{АБ}} = 25,5 - 27 \text{ В}$) аккумуляторной батарее для трех ВАХ (1. $U_{\text{хх}} =$

$=36 \text{ В}; I_{\text{кз}} = 5 \text{ А}. P_{\text{СБ}(30)} = 120 \text{ Вт}; 2. U_{\text{хх}} = 40 \text{ В}, I_{\text{кз}} = 7 \text{ А}. P_{\text{СБ}(30)} = 192 \text{ Вт}; 3. U_{\text{хх}} = 48 \text{ В}, I_{\text{кз}} = 9 \text{ А}. P_{\text{СБ}(30)} = 268 \text{ Вт}).$

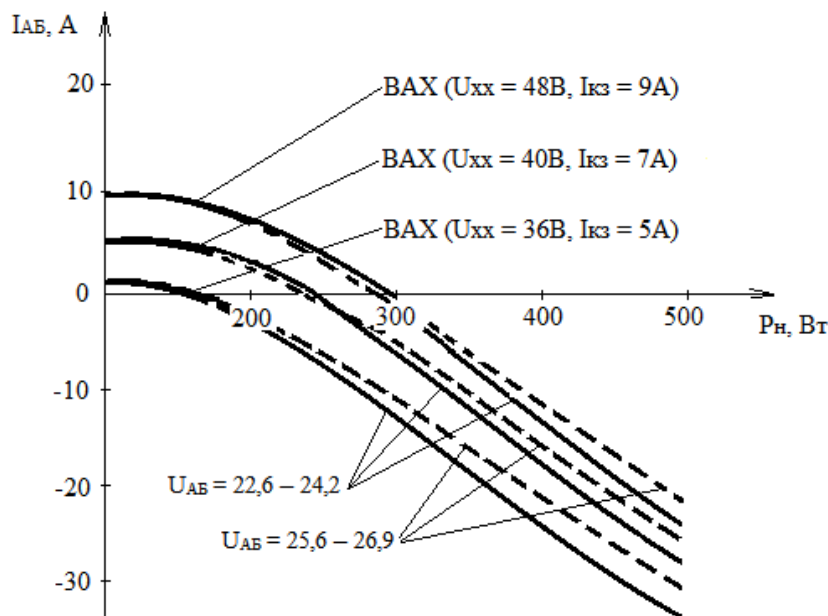


Рисунок 4.34 – Зависимости тока АБ от мощности нагрузки и параметров ВАХ СБ при $U_{\text{АБ}} = 22,6 - 24,2 \text{ В}$ и $U_{\text{АБ}} = 25,5 - 26,9 \text{ В}$

Каждую кривую можно разбить на два участка:

- первый $I_{\text{АБ}} > 0$ - происходит заряд АБ всем избытком мощности СБ;
- второй $I_{\text{АБ}} < 0$ - происходит разряд аккумуляторной батареи, АБ компенсирует недостаток мощности СБ. Чем выше мощность СБ, тем при более высоком значении нагрузки прекращается заряд аккумуляторной батареи и начинается ее разряд.

Выводы по главе 4

1. Разработана и изготовлена автономная фотоэлектрическая энергетическая установка (АФЭУ-0,5) и контроллер заряда аккумуляторных батарей, экспериментально подтверждена их работоспособность.

2. Разработана система экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей, обеспечивающая устойчивое регулирование максимума мощности солнечной батареи и коэффициент ее использования не менее 98%:

- частота шагового изменения напряжения СБ – не менее 1 Гц;
- допустимая величина шагового изменения напряжения СБ – до 1 В.

Определен рабочий диапазон поиска экстремума мощности для наземных АФЭУ в зависимости от температуры и освещенности СБ – 30 В.

3. Разработанный на основе понижающего преобразователя контроллер заряда аккумуляторных батарей с функцией экстремального регулирования мощности солнечных батарей при мощности СБ больше 100 Вт обеспечивает КПД в пределах 95,5% - 96,5%.

4. Экспериментально подтверждено, что прирост мощности солнечной батареи при экстремальном шаговом регулировании мощности СБ по сравнению с параллельным соединением СБ и АБ - до 28 %.

5. Результаты испытаний системы экстремального шагового регулирования мощности СБ с параметрами $\Delta U=1$ В и частотой изменения напряжения 1 Гц при реальном солнечном освещении практически совпадают с результатами имитационного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию и разработке энергоэффективных автономных энергетических установок на основе фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей.

Основные результаты и выводы диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведено исследование структур автономных энергетических установок на основе фотоэлектрических преобразователей с реализацией способов повышения их энергетической эффективности. Показано, что реализация экстремального регулирования мощности солнечных батарей – наиболее действенный способ повышения энергетической эффективности АФЭУ, сопоставимый со способом автоматического слежения солнечных батарей за Солнцем, но проще реализуемый практически.

2. Разработана методика проектирования автономных энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности, позволяющая определить рациональную структуру и технические параметры энергетической установки для заданных условий эксплуатации и графика энергопотребления.

3. Проведен анализ способов и алгоритмов регулирования экстремума мощности солнечных батарей и показано, что шаговый способ обеспечивает устойчивое регулирование точки экстремума мощности на ВВХ в любых изменяющихся условиях эксплуатации СБ.

4. Разработана система экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей, обеспечивающая устойчивое регулирование максимума мощности солнечной батареи и коэффициент ее использования не менее 98%:

- частота шагового изменения напряжения СБ – не менее 1 Гц;
- допустимая величина шагового изменения напряжения СБ – от 0,5 до 1 В.

Определен рабочий диапазон поиска экстремума мощности для наземных АФЭУ в зависимости от температуры и освещенности СБ – 30 В.

5. Разработан контроллер заряда аккумуляторных батарей на основе понижающего преобразователя с экстремальным шаговым регулированием мощности СБ, с частотой изменения напряжения СБ 1 Гц и величиной шагового изменения 1 В, который обеспечивает стабильную, эффективную работу с КПД до 96,5%.

6. Проведены экспериментальные исследования разработанной автономной фотоэлектрической энергетической установки, подтверждены расчетные технические характеристики АФЭУ – 0,5. Результаты испытаний при реальном солнечном освещении фотоэлектрических панелей КСМ-160 совпадают с результатами имитационного моделирования в MatLab Simulink.

7. Предложены практические рекомендации по определению исходных параметров проектирования и эксплуатации фотоэлектрических энергетических установок на основе полученных экспериментальных данных:

- зависимость температуры фотоэлектрических преобразователей от температуры окружающей среды и времени суток;
- скорость нагрева и охлаждения фотоэлектрических преобразователей при изменяющихся внешних условиях;
- время и скорость затенения солнечных батарей облаками.

Новизна полученных результатов диссертационной работы подтверждена полученными патентами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиняков Ю.А. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью/ Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, А.В. Осипов, О.А. Теущаков, К.В. Аржанов// Доклады ТУСУРа. – 2011.- № 2 (24), часть 1.- С. 282-287.
2. Никулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
3. Все о солнечных батареях и энергии солнца: виды солнечных батарей [Электронный ресурс]/ Электрон. текстовые дан. – 2015.- Режим доступа: <http://www.solnpanels.com/vidy-solnechnyh-batarej/> свободный.
4. RenEn: Солнечная энергетика: крупнейшие производители поликремния и прогноз на 2018 год. [Электронный ресурс]// Электрон. текстовые дан. – 2018.- Режим доступа: <http://renen.ru/solar-energy-the-largest-polysilicon-producers-and-the-forecast-for-2018/>, свободный.
5. SWW-Energy: Тонкопленочные солнечные батареи. [Электронный ресурс]/ Электрон. текстовые дан. – 2016.- Режим доступа: <http://sww-energy.ru/solnechnye-batarei/12-tonkoplenochnye-solnechnye-batarei.html>, свободный.
6. Солнечные батареи: Полимерные солнечные батареи и их преимущества [Электронный ресурс]// Электрон. текстовые дан. – 2018.- Режим доступа: <http://solarb.ru/polimernye-solnechnye-batarei-i-ikh-preimushchestva>, свободный.
7. Солнечные батареи альтернативные источники энергии: Арсенид-галлиевые солнечные батареи. [Электронный ресурс]// Электрон. текстовые дан. – 2018.- Режим доступа: <http://www.solar-battery.com.ua/arsenid-gallievyye-solnechnyye-batarei/>, свободный.
8. Контроллер заряда автономных фотоэлектрических энергетических установок / А.И. Отто // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность:

Труды XIV международного студенческого научно – технического семинара. г. Томск, 24-27 апреля 2012 г. – Томск: ТПУ, 2012 – т. 1. С. – 211-215.

9. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. / Г. Раушенбах. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 360 с.

10. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи / А.М. Васильев, А.П. Ландсман. - М.: Сов. радио, 1971. – 246 с.

11. Исследование энергетической эффективности солнечных батарей при недостаточной освещенности и температурной нестабильности фотоэлектрических элементов / Отто А.И. // Научная сессия ТУСУР: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. г. Томск, 16 -18 мая 2012 г. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – С. 179-182.

12. Влияние интенсивности света и температуры на параметры кремниевых фотопреобразователей / С.Н. Борисов, С.М. Городецкий, Г.М. Григорьева, К.Н. Звягина, А.М. Касымахунова // Гелиотехника. - 1983. - №4.

13. Кудряшов В.С. Концепция бортовой системы электроснабжения связного геостационарного ИСЗ / В.С. Кудряшов, Ш.Н. Исляев // Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства. Т.1. Аппаратура управления и преобразования энергии: Сб. науч. трудов НПО «Полнос». - Томск, 1992. - С. 17 – 24.

14. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей / Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, А.В. Осипов, М.М. Черная // Альтернативная энергетика и экология – 2015. – № (8-9) – С. 12-18.

15. Все о релейной защите: Режим работы аккумуляторных батарей [Электронный ресурс]// Электрон. текстовые дан. – 2009.- Режим доступа: http://rza.org.ua/elteh/read/211--Rezhim-raboti-akkumulyatornih-batarey_211.html, свободный.

16. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М., Скундин. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 360 с.
17. Никель-кадмиевые (Ni-Cd) аккумуляторы. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2018.– Режим доступа: <http://www.powerinfo.ru/accumulator-nicd.php>, свободный.
18. Энциклопедия по машиностроению XXL: Аккумуляторы никель-железные [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2016.– Режим доступа: <http://mash-xxl.info/info/267021>, свободный.
19. Гелевая технология [Электронный ресурс]// Электрон. текстовые дан. – 2016.– Режим доступа: <https://www.varta-automotive.ru/ru-ru/technology/gel-battery-technology>, свободный.
20. FLEXmaxChargeControllers. [Электронный ресурс]// Электрон. текстовые дан. – 2016.– Режим доступа: <http://www.outbackpower.com/forum/viewforum.php>, свободный.
21. АльтЭко: Контроллеры заряда. [Электронный ресурс] Электрон. текстовые дан. – 2013. – Режим доступа: <http://www.altecology.ru/kontrollery-zaryada/outback>, свободный.
22. MPPT контроллеры: Что такое MPPT контроллеры. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2016.– Режим доступа: <http://www.solarhome.ru/ru/control/mppt>, свободный.
23. SunSaver MPPT. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.morningstarcorp.com/en/sunsavermpt>, свободный.
24. INVETRA: Высокоэффективный контроллер заряда MorningstarTriStar-MPPT. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2004. – Режим доступа: <http://www.inverta.ru/ms//1//11>, свободный.
25. SOLNECHNYE.RU: О контроллере Tracer-2215RN. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2012. – Режим доступа:

<http://www.solnechnye.ru/news/otzyv-o-controllere-zaryada-MPPT-Epsolar-Tracer-2215RN.htm>, свободный.

26. Продукция: Контроллеры заряда [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2014. – Режим доступа: <http://www.solarroof.ru/products/54>, свободный.

27. Контроллер EPSolar Tracer-2215RN MPPT [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2014. – Режим доступа: <http://helios-resource.ru/kontroller-epsolar-tracer-2215rn-mppt-1224v-20a.html>, свободный.

28. EcoVolt: Солнечные батареи и необходимое оборудование. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2014. – Режим доступа: http://ecovolt.ru/catalog/Kontrollery_solnechnye/kontroller_zaryada_steca_solarix_mpp_t_2010, свободный.

29. Солар Грид: StecaSolarix MPPT 1010. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2014. – Режим доступа: http://solargrid.ru/magazin?mode=folder&folder_id=16493406, свободный.

30. StecaSolarix MPPT. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.steca.com/index.php?Steca_Solarix_MPPT_en, свободный.

31. Солнечный контроллер ProsolarSunStar MPPT. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.prosolar.ru/ru/component>, свободный.

32. Электростанции. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.electrogid.ru/kontroller_zaryada_prosolar_sunstar, свободный.

33. ProsolarSunStar MPPT SS-40CX 40A Контроллер заряда. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2013. – Режим доступа: <http://energy-plus.opt.ru/good/1213814>, свободный.

34. Xantrex XW-MPPT 60-150. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2013. – Режим доступа: <http://www.solarinntech.ru/products/detail.php?ID=220>, свободный.
35. Контроллер заряда EPSolarTracer 2215 RN 12/24 В 20 А. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2012. – Режим доступа: http://ingenerdom.ru/catalogue_goody-goody_id-518.html, свободный.
36. Groumpos P.P., Papageorgiou G. (1987) An optimal sizing method for stand-alone photovoltaic power systems. *Solar Energy.*, v. 38, 5, pp. 341-351.
37. Hybrid2. (1996). The Hybrid System Simulation Model. Theory Manual. University of Massachusetts. Amherst, Massachusetts. 195 pp.
38. Chapman R.N. (1987) A simplified technique for designing least cost stand-alone pv/storage systems. 19th IEEE Photovolt Spec. Conf., New Orleans, 1987. - NY, pp.1117-1121.
39. Groumpos P.P., Papageorgiou G. (1987) An optimal sizing method for stand-alone photovoltaic power systems. *Solar Energy.*, v. 38, 5, pp. 341-351.
40. Ashenayi K., Ramakumar R. (1986). Design of solar energy systems for supplying power to remote communications centers. INTELEC 86: Int. Telecommun. Energy Conf., Toronto, pp 325 - 332.
41. Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций/ Г.П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – 2013.- № 3.- С. 222-230.
42. Иродионов А.Е. Реверсивно-балансовый метод проектирования автономных солнечных фотоэлектрических установок: дис. ... кандидата технических наук : 05.14.08 / Всерос. НИИ электрофикации сельского хозяйства. - Москва, 2000. - 23 с.
43. Иванчура В.И. Имитационная модель автономной системы электропитания/ В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев, С.С. Пост// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2014. – Т.325 №4.- С. 111-120.

44. Типы свинцово-кислотных аккумуляторов [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2013. – Режим доступа: <http://www.solarhome.ru/basics/batteries/batteries.htm>, свободный.
45. AbdEssalamBadoud, Mabrouk KHEMLICHE Modeling, design and simulation of stand-alone photovoltaic power systems with battery storage. Leonardo Journal of Sciences, 2013.
46. Фотоэлектрические системы. Перспективы. Состав. Параметры [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2013. – Режим доступа: <http://pochit.ru/fizika/32633/index.html>, свободный.
47. Аналитика [топ-10]: Топ-10 солнечных электростанций [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2016. – Режим доступа: <http://topneftegaz.ru/analysis/view/7620>.
48. Шиняков Ю.А. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, О.А. Теущаков, А.В. Осипов, К.В. Аржанов // Доклады ТУСУРа. – 2011.- № 2 (24), часть 1.- С. 283.
49. Gulin M., Pavlovic T., Vasak M. Photovoltaic panel and array static models for power production prediction: Integration of manufacturers' and on-line data. Journal of Renewable Energy, 2016, 97, pp. 399-413.
50. Осипов А. В. Сопоставительный анализ энергетической эффективности преобразования энергии солнечной батареи преобразователями постоянного напряжения/ А.В. Осипов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – №. 1 (27).
51. Привалов В.Д. Оценка эффективности применения экстремального регулятора в автономных СЭП / В.Д. Привалов, В.Е. Никифоров. – Куйбышев: КПИ, 1981. – 16 с.
52. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.

53. All About Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controllers [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2013. – Режим доступа: <https://www.solar-electric.com/mppt-solar-charge-controllers.html>, свободный.

54. GEOS24705/Solar Photovoltaics [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2011. – Режим доступа: <http://geosci.uchicago.edu/~moyer/GEOS24705/2011/Notes/SolarPhysics.pdf>, свободный.

55. Rahmani R. et al. Implementation of fuzzy logic maximum power point tracking controller for photovoltaic system //Am. J. Applied Sci. – 2013.

56. Egiziano L. et al. Performances improvement of maximum power point tracking perturb and observe method //Proc. of IASTED International Conference on Advanced Technology in the Environmental Field (ATEF 2006), Lanzarote, Spain. – 2006.

57. Hohm D. P., Ropp M. E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed //Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE. – IEEE, 2000. – С. 1699-1702.

58. Hohm D. P., Ropp M. E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms //Progress in photovoltaics: Research and Applications. – 2003. – Т. 11. – №. 1. – С. 47-62.

59. Tung Y. M., Hu A. P., Nair N. K. Evaluation of micro controller based maximum power point tracking methods using dSPACE platform //Australian university power engineering conference. – 2006.

60. Шиняков Ю. А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королева (национального исследовательского университета). – 2007. – №. 1.

61. Шиняков Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Аркатова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22), ч. 2. – С. 102–107.

62. Солнечное фотоэлектрическое устройство/ Аржанов В.В.(RU), Теущаков О.А., Шиняков Ю.А., Аржанов К.В., Отто А.И.// Патент на полезную модель №:128781 от 27.05.2013.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и инновациям

д.т.н., профессор

Р.В. Мещеряков

«__» _____ 20__ г.

Акт о внедрении

результатов диссертационной работы А.И. Отто

«Автономные энергетические установки с экстремальным регулированием мощности фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии»

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы А.И. Отто внедрены при выполнении федеральных целевых программ **«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009 - 2013»** по следующим темам:

1. «Разработка и создание автономных фотоэлектрических установок с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей» (Государственный контракт № П912, (26.05.2010), 2010-2012);
2. «Разработка и создание автономных энергетических установок с автоматическим слежением фотоэлектрических панелей за солнцем» (Государственный контракт № 16.740.11.0067, (01.09.2010), 2010 - 2012);
3. «Разработка и создание автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры на основе имитаторов солнечных и аккумуляторных батарей для испытаний бортовых систем электропитания и космических аппаратов в целом на всех стадиях отработки» (Государственный контракт № 02.740.11.0524, 15.03.2010 - 01.10.2012);
4. «Разработка контроллера заряда-разряда аккумуляторных батарей, обеспечивающего экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автономных фотоэлектрических энергетических установок» (Государственный контракт № 14.B37.21.1493, 12.10.2012- 15.11.2013);
5. «Разработка научно-технических основ создания модульных имитаторов высоковольтных солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания космических аппаратов» (Государственный контракт № 14.B37.21.0420, 06.08.2012 -15.11.2013).

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении работ по **Программе стратегического развития ТУСУРа 2012-2016** по следующим темам:

1. «Разработка и создание автономных энергетических установок с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей и автоматическим слежением фотоэлектрических панелей за солнцем» (подпроект 2.3.1.4. 01.01.2012 - 30.11.2013)
2. «Исследование и разработка интеллектуальных высоковольтных систем электропитания космических аппаратов с повышенной энергетической эффективностью на основе регулируемых высокочастотных инверторно-трансформаторных преобразователей» (подпроект 2.3.1.2, 01.01.2014-25.12.2014).

В вышеуказанных государственных контрактах, договорах и госбюджетных работах использованы следующие полученные результаты:

1. Методика проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок, основанная на расчете энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности, позволяющая в процессе проектирования оптимизировать структуру и технические параметры энергетической установки;
2. Экспериментальные результаты для расчета оптимальных технических характеристик контроллера заряда аккумуляторных батарей;
3. Практические рекомендации по проектированию и эксплуатации фотоэлектрических энергетических установок;

4. Результаты разработки, изготовления и испытания макетного образца контроллера заряда АБ, реализующего экстремальное шаговое регулирование мощности солнечных батарей и обеспечивающего повышение энергетической эффективности автономной фотоэлектрической установки до 30%;

5. Результаты разработки системы экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей (СБ), обеспечивающей высокие энергетические и эксплуатационные характеристики: коэффициент энергетической эффективности солнечной батареи выше 98%; устойчивый поиск точки максимальной мощности ВАХ СБ.

На результаты интеллектуальной деятельности А.И. Отто получены:

1. Патент на полезную модель №:128781 Российская Федерация МПК:F16M H01L Солнечное фотоэлектрическое устройство/ Аржанов В.В.(RU), Теущаков О.А., Шиняков Ю.А., Аржанов К.В., Отто А.И.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"; дата публикации: 27.05.2013.

2. Патент на изобретение RU 2560720 C1 Российская Федерация. Система электропитания космического аппарата с экстремальным регулированием мощности солнечной батареи/Осипов А.В., Шиняков Ю.А., Сунцов С.Б., Школьный В.Н., Нестеришин М.В, Черная М.М., Отто А.И.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"; дата публикации: 20.08.2015.

Директор НИИ космических технологий,
д.т.н.

 Ю.А. Шиняков

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального
конструктора по электрическому
проектированию и системам
управления КА



С.Г. Кочура

« » 2017

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Отто Артура Исааковича

Комиссия в составе начальника отделения электрического проектирования и испытаний КА С.И. Опенько, начальника отдела бортовых систем электропитания КА М.В. Нестеришина, ведущего инженера-конструктора отдела бортовых систем электропитания КА Д.В. Почебута составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ» имени академика М.Ф. Решетнева» результатов диссертационной работы А.И. Отто, а именно результаты исследования параметров экстремального регулирования мощности солнечных батарей.

Начальника отделения электрического
проектирования и испытаний КА

С.И. Опенько

Начальника отдела бортовых систем
электропитания КА

М.В. Нестерин

Ведущий инженер-конструктор отдела
бортовых систем электропитания КА

Д.В. Почебут