



На правах рукописи

Отто Артур Исаакович

**АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в НИИ космических технологий
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель - доктор технических наук,
Юрий Александрович Шиняков

Официальные оппоненты: **Юрий Вадимович Краснобаев**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», профессор кафедры
САОУП ИКИТ

Алексей Васильевич Юрченко
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
государственный университет»,
профессор кафедры управления
качеством

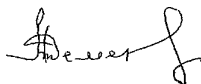
Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится «19» декабря 2018 г. в 16:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.11 к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Коэффициент преобразования падающей солнечной энергии современных автономных фотоэлектрических энергетических установок (АФЭУ) 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 их генерирующих возможностей.

Недоиспользование энергии солнечных батарей до 30% объясняется отсутствием у большинства автономных фотоэлектрических энергетических установок систем регулирования максимума мощности СБ, хотя целесообразно их использование при проектировании и создании АФЭУ как с системами непрерывного автоматического наведения СБ на Солнце, так и статично установленными 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 рациональное 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 регулирования мощности солнечных батарей и

расчета рациональных параметров АФЭУ с учетом энергобаланса и статистических значений графика инсоляции конкретной местности.

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.

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 значений 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 и 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»; Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2012»; научно-технических совещаниях 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.

Структура и объем работы

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследований, их научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе проведен обзор структурных схем энергетических систем и установок на основе фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Проведен анализ характеристик и режимов эксплуатации солнечных и аккумуляторных батарей

энергетических установок на основе фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии с реализацией экстремального регулирования мощности СБ.

Приведены и проанализированы способы повышения энергетической эффективности установок с фотоэлектрическими преобразователями солнечной энергии. Эффект от реализации режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей зависит от диапазона изменения рабочей температуры фотоэлектрических панелей. Анализ показывает, что в сравнении с системами с параллельным соединением СБ и АБ (рабочее напряжение СБ равно напряжению АБ) энергетическая эффективность при реализации режима экстремального регулирования мощности СБ может достигать 30%.

Во второй главе проведен сравнительный анализ энергетической эффективности и параметров различных структур АФЭУ. Приведены методы определения параметров и характеристик автономных фотоэлектрических энергетических установок и разработанная методика проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок на основе расчета энергобаланса и статистических значениях графика инсоляции конкретной местности.

На рисунке 1 представлен типовой график энергопотребления помещения жилого или производственного назначения (где $t_2 - t_1$ – продолжительность светового дня).

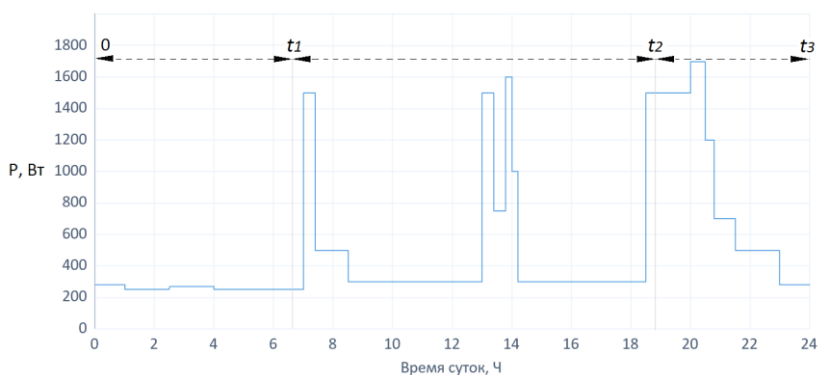


Рисунок 1 – Типовой график энергопотребления

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:

$$W_{24} = \int_0^{24} P_n dt, \quad (1)$$

где P_n - потребляемая нагрузкой мощность.

Количество, емкость и номинальное напряжение аккумуляторных батарей определяется на основе полученного расчетного графика энергопотребления.

Основными условиями по выбору аккумуляторов являются:

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

Номинальное напряжение АБ может составлять 12, 24, 48 В, которое влияет на параметры инвертора, средств управления и зарядного устройства. Фотоэлектрические энергетические установки, производящие менее 1000-1500 Вт·ч в день, лучше всего сочетаются с напряжением 12 В, производящие 1000-3000 Вт·ч - 24 В, а в установках, производящих более 3000 Вт·ч в день, рекомендуется использовать АБ с напряжением 48 В и выше.

Емкость аккумуляторных батарей целесообразно выбирать из расчета количества последовательных дней без солнца. На рисунке 2 приведен пример графика, показывающего уровень приходящей солнечной радиации, составленный на основе данных интернет ресурса с календарем погоды. Из анализа графика следует, что количество последовательных дней без солнца не превышает трех.

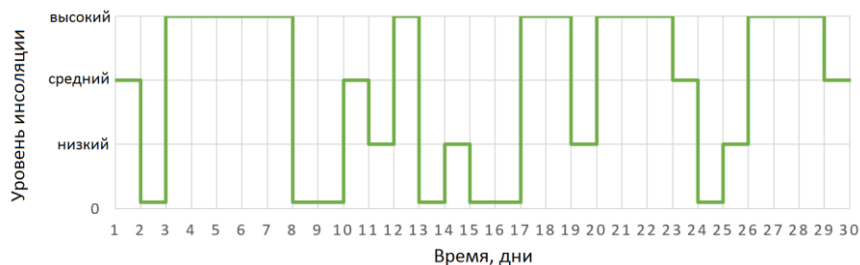


Рисунок 2 – График уровня инсоляции

Таким образом, емкость аккумуляторной батареи рассчитывается по формуле:

$$C_{AB} = \frac{W_{24} \cdot N}{U_{AB} \cdot \eta_p}, \quad (2)$$

где C_{AB} – необходимая емкость аккумуляторной батареи;

W_{24} – потребляемая нагрузкой суточная энергия;

N – количество последовательных дней без заряда АБ от СБ;

U_{AB} – номинальное напряжение аккумуляторной батареи;

η_p – допустимая глубина разряда.

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:

$$W_{CB(k+m)} = m \cdot 1,2 \int_0^{24} P_n dt + k \cdot 1,2 \int_0^{t_1} P_{n(\text{тень})} dt + k \int_{t_1}^{t_2} P_{n(\text{свет})} dt + k \cdot 1,2 \int_{t_2}^{t_3} P_{n(\text{тень})} dt, \quad (3)$$

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:

$$W_{CB(24)} = \frac{W_{CB(k+m)}}{k}, \quad (4)$$

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 заданными углами, наличие системы автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем);
- наличие системы экстремального регулирования мощности СБ.

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

$$S_{CB} = \frac{W_{CB(24)}}{W_{CB.m^2(24)}}, \quad (5)$$

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

$$W_{CB.m^2(24)} = \frac{P_{CB.m^2} \cdot (t_2 - t_1) \cdot K_{ЭРМ}}{K_{уст}}, \quad (6)$$

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

$t_2 - t_1$ – 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:

- 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.

В настоящее время существует несколько типов контроллеров заряда АБ. Наиболее распространенные из них – контроллеры с широтно-импульсной модуляцией тока заряда (ШИМ) без реализации режима экстремального регулирования мощности (ЭРМ) СБ и контроллеры (с ШИМ) с функцией ЭРМ СБ. Контроллеры с ЭРМ СБ до 30% эффективнее, чем контроллеры с ШИМ тока заряда.

При выборе контроллеров необходимо учитывать рабочие значения напряжений СБ и АБ, а также значение номинального тока.

Контролер 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 солнечной и аккумуляторной батареи в переменный синусоидальной формы, необходим инвертор.

К инвертору автономной фотоэлектрической энергетической установки предъявляются следующие требования:

- 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;
- отсутствие помех на радиочастотах.

При выборе инвертора тока необходимо учитывать всю суммарную мощность потребления электрических приборов, подключаемых к инвертору, и увеличить это значение на 40%. Выбранный на эту мощность инвертор позволит обеспечивать включение таких электроприборов как компрессорный холодильник, насосы и др., с пусковыми мощностями, превышающими паспортные значения.

Таким образом, предлагаемая методика проектирования автономных энергетических установок заключается в поэтапном решении следующих задач:

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

В третьей главе рассмотрены преобразователи постоянного напряжения систем экстремального регулирования мощности солнечных батарей. Проведенное сопоставление преобразователей по критериям коэффициента использования солнечной батареи и коэффициента полезного действия показывает, что понижающий

преобразователь наиболее просто согласуется с системами ЭРМ СБ путем регулирования скважности работы силовых ключей и при стандартных ВАХ рационален для применения в контроллерах заряда АФЭУ с ЭРМ СБ.

Проведен анализ способов регулирования максимума мощности солнечных батарей, в ходе которого выбран шаговый способ регулирования экстремума для реализации в контроллере заряда АБ.

С целью прогнозирования энергетической эффективности АФЭУ и исследования зависимости точности регулирования экстремума от шагового изменения напряжения стабилизации СБ ($\Delta U_{ст}$) построена имитационная модель АФЭУ в графической среде имитационного моделирования *MatLab Simulink* (рисунок 3). Модель состоит из солнечной и аккумуляторной батарей, нагрузки и контроллера заряда с функцией экстремального регулирования мощности СБ. Параметры всех блоков модели заданы с учетом технических характеристик, а также на основе полученных экспериментальных данных.

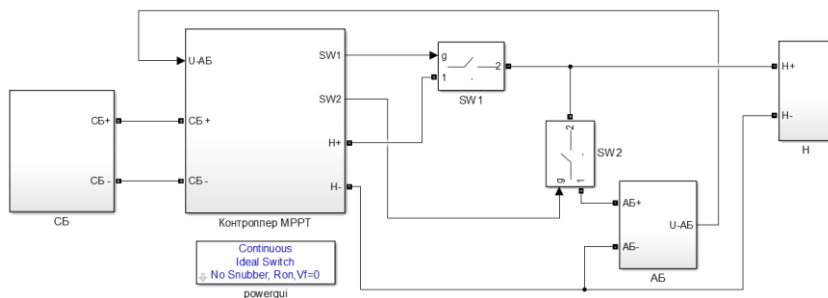


Рисунок 3 – Имитационная модель АФЭУ

Вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики фотоэлектрических панелей КСМ-160 при разных значениях температуры и освещенности, измеренные в разное время года, приведены на рисунке 4, из анализа которых следует, что значение генерируемой мощности существенно зависит от места расположения солнечной батареи и условий ее эксплуатации. Реальные практические значения $U_{опт}$ находятся в пределах 22 - 44 В. 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°C. Таким образом, из анализа ВАХ и ВВХ солнечных батарей следует, что при проектировании энергетических установок с экстремальным шаговым регулированием мощности (ЭШР) СБ необходимо принимать рабочий температурный диапазон фотоэлектрических модулей от -30 до + 70 °С, следовательно, диапазон поиска экстремума мощности должен быть не менее 30 В (20-50 В) (рисунок 4).

Экспериментально установлено, 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. Таким образом, максимальное значение скорости дрейфа ВВХ при изменении температуры фотоэлектрических преобразователей может составлять $\approx 0,03$ В/с.

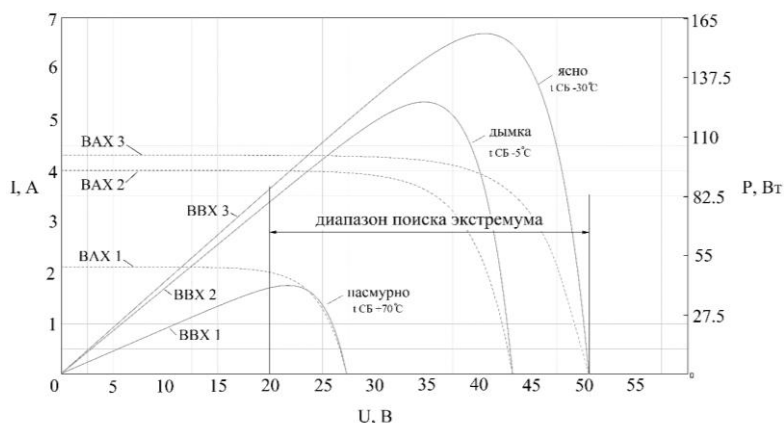


Рисунок 4 – Семейство вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик фотоэлектрических панелей КСМ-160 при различной температуре и степени освещенности

Зависимость энергетической эффективности использования СБ по мощности $P_{СБ}/P_{\text{макс.СБ}}$ от значения шагового изменения $U_{СБ}$ ($\Delta U_{\text{ст}}$) для СБ, ВВХ которых представлены на рисунке 4, приведены в таблице 1. Из анализа значений энергетической эффективности использования СБ по мощности следует, что при пошаговом изменении $U_{СБ}$, не

превышающем 2 В, гарантируется отбор максимальной мощности от СБ с точностью не менее 98% ($P_{\text{СБ}} < 2\% P_{\text{макс СБ}}$).

Таблица 1 – Значение энергетической эффективности использования СБ по мощности от значения шагового изменения

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

В системе автоматической оптимизации шагового типа при неизменных условиях эксплуатации теоретически возможное минимальное количество шагов – два или три. Двухшаговый режим поиска экстремума мощности осуществляется, когда рабочая точка на ВВХ при очередном шаговом изменении $U_{\text{СБ}}$ попадает в область оптимального значения мощности СБ (рисунок 5) и при каждом втором шаговом изменении $U_{\text{СБ}}$ происходит уменьшение мощности, генерируемой СБ. Трехшаговый режим теоретически возможен в аналоговых системах регулирования мощности СБ и наличии гистерезиса в системе при каждом шаговом изменении $U_{\text{СБ}}$. В системе автоматической оптимизации шагового типа с цифровыми системами измерения мощности СБ трехшаговый режим практически невозможен.

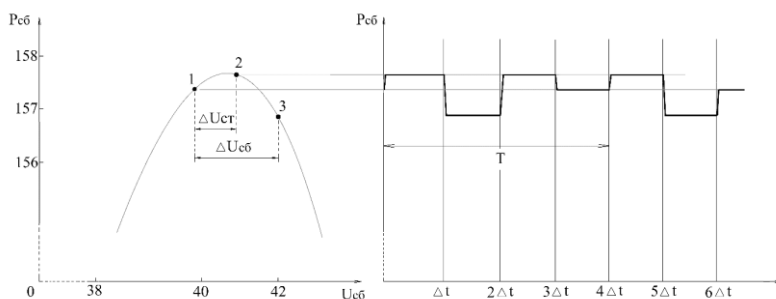


Рисунок 5 – Диаграмма двухшагового режима поиска экстремума мощности СБ

При затенении фотоэлектрических панелей облаками преимущественно изменяется уровень генерируемой мощности, но практически не успевает измениться температура панелей. При

большой скорости изменения освещенности система ЭРМ может перейти в одношаговый режим, т.е. направление поиска экстремума мощности изменяется после каждого шага. Схематически процесс регулирования в этом случае показан на рисунке 6. Измерение мощности экстремальным регулятором производится в точках 2' и 3'.

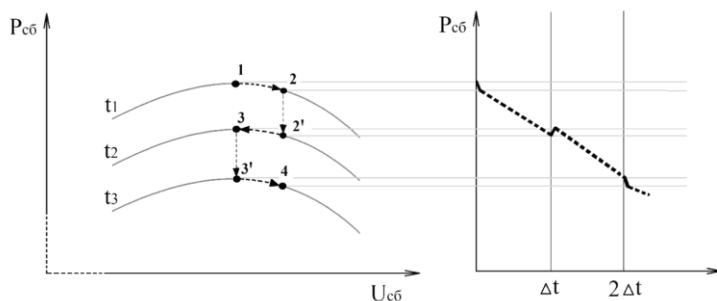


Рисунок 6 – Диаграммы регулирования экстремума мощности СБ при затенении фотоэлектрических панелей облаками

Таким образом, в ходе имитационного моделирования и экспериментальных исследований контроллера заряда АБ с шаговым экстремальным регулятором мощности СБ, входящим в состав автономной энергетической установки определен диапазон поиска экстремума мощности в зависимости от температуры и освещенности СБ, равный 30 В. При использовании цифровой системы управления с шагом экстремального регулятора $\Delta U = 1$ В и частотой регулирования 1-2 Гц энергетическая эффективность устройства составляет более 98 % от максимально возможной мощности СБ. При изменяющейся ВАХ во время нестабильных внешних условий система показывает стабильную и эффективную работу, осуществляя поиск экстремума в двухшаговом и одношаговом режимах.

В четвёртой главе приведены внешний вид разработанного контроллера заряда с ЭРМ СБ (рисунок 7) и механическая конструкция АФЭУ-0,5 (рисунок 8).

Описан принцип работы контроллера заряда АБ с ЭШР СБ. Также приводятся графики, полученные при испытаниях макетного образца контроллера заряда АБ в составе АФЭУ-0,5 ЭРМ в различных режимах и условиях эксплуатации.



Рисунок 7 – Контроллера заряда с ЭШР СБ



Рисунок 8 – Механическая часть энергетической установки АФЭУ-0,5 с двумя фотоэлектрическими панелями КСМ-160

На рисунке 9 изображены зависимости коэффициента использования по мощности (K_p) солнечных батарей от напряжения в режимах стабилизации напряжения рабочей точки СБ и ЭРМ СБ, полученных в ходе экспериментальных исследований при реальном солнечном освещении и с использованием имитатора солнечных батарей (ИБС-200/7-4).

Коэффициент использования при ЭРМ СБ изменяется в небольших пределах $K_p = 99 - 99,7\%$. Это объясняется различием положения точек регулирования U_{CB} относительно вершины ВВХ. При мощности СБ больше 100 Вт значение КПД контроллера заряда АБ находится в пределах 95,5 – 96,5%.

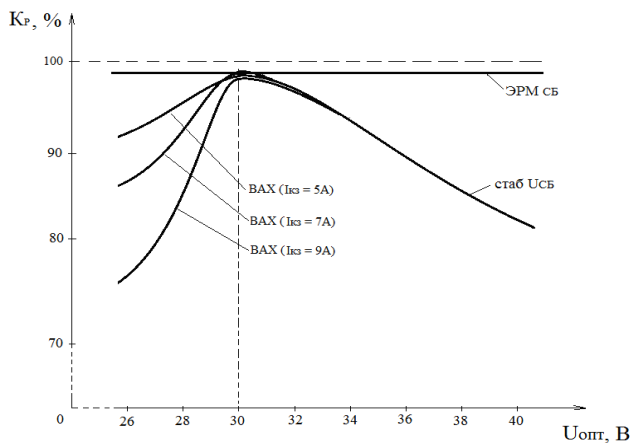


Рисунок 9 – Зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей при стабилизации напряжения рабочей точки СБ и ЭРМ СБ

Анализ графиков, полученных при имитационном моделировании (рисунок 10), показывает, что ЭШР с величиной шага регулирования напряжения $\Delta U = 1\text{ В}$ и частотой регулирования 1-2 Гц позволяет достичь коэффициент использования СБ по мощности более 98%. В ходе проведения моделирования и экспериментальных исследований получены градиенты измеряемых мощностей достаточные для устойчивого регулирования максимума мощности СБ.

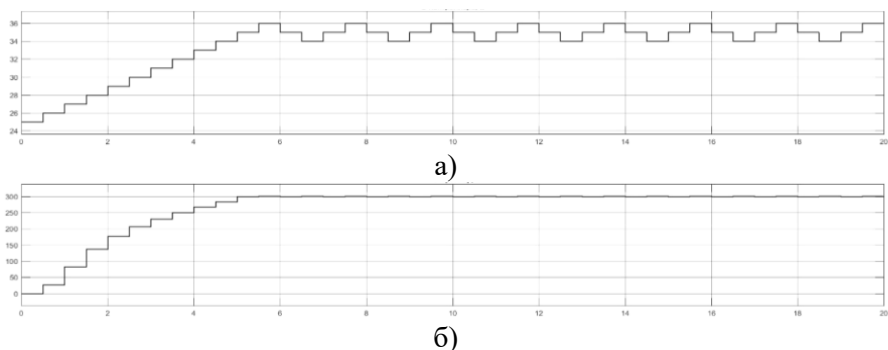


Рисунок 10 – Временные диаграммы работы СБ в режиме ЭШР (величина шага – 1 В, частота шага – 2 Гц):
а – напряжение СБ; б – мощность СБ

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%.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы, рекомендации по их применению, описана их новизна и практическая значимость.

В приложении представлены акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных теоретических, экспериментальных исследований и обобщения итогов практических работ, направленных на решение задач, связанных с разработкой контроллера заряда с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей и разработкой методики проектирования автономных фотоэлектрических энергетических установок, получены следующие результаты:

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%.

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.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Отто А.И.** 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 Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1 (27). – С.14-19.

2. **Отто А.И.** Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых преобразователей с промежуточным звеном повышенной частоты / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 126-132.

3. **Отто А.И.** Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых инверторов тока / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 100-107.

4. **Отто А.И.** Обеспечение благоприятного переключения транзисторов инвертора тока в преобразователях со звеном повышенной частоты / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто,

М.М. Черная, А.А. Ткаченко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 138–145.

5. **Отто А.И.** 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.

Публикация в базе Scopus

6. **Otto Arthur I.** Design Procedure for Autonomous Photovoltaic Power Systems Based on the Calculation of Power Balance and Statistical Values of the Insolation Diagram for a Given Area / Yuri A. Shinyakov, Arthur I. Otto // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, N 19. – P. 9929–9934.

Публикации в других изданиях

7. **Отто А.И.** Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических систем преобразования солнечной энергии / Ю.А. Шиняков, М.М. Черная, В.В. Аржанов, А.В. Осипов, А.И. Отто // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения: сборник трудов I Всероссийской конференции, г. Чебоксары, 19-20 мая 2013 г. – Чебоксары: типография «Полиграфика», 2013. – С. 94-97.

8. **Отто А.И.** 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. **Отто А.И.** Исследование энергетической эффективности солнечных батарей при недостаточной освещенности и температурной нестабильности фотоэлектрических элементов / А.И. Отто // 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. – Т. 1. – С. 179–182.

Патенты

10. Солнечное фотоэлектрическое устройство: пат. на полезную модель 128781 Рос. Федерация / Аржанов В.В., Теущаков О.А., Шиняков Ю.А., Аржанов К.В., Отто А.И. – Опубл. 27.05.2013.

11. Система электропитания космического аппарата с экстремальным регулированием мощности солнечной батареи: пат. RU 2560720 С1 / Осипов А.В., Шиняков Ю.А., Сунцов С.Б., Школьный В.Н., Нестеришин М.В., Черная М.М., Отто А.И. – Опубл. 20.08.2015.