

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 103–131
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>
UDC 656.2

DEVELOPMENT OF AN ENERGY SYSTEM WITH EXTREME STEPWISE CONTROL OF SOLAR PANEL POWER

G.S. Aitkazyeva

"Cargo Transit" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com

Gulshat Aitkazyeva — manager, "Cargo Transit" LLP, Almaty, Kazakhstan
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4429-3701>.

© G.S. Aitkazyeva

Abstract. In the context of increasing demand for alternative energy sources, the development of efficient autonomous photovoltaic systems becomes particularly important. This study focuses on the creation of a photovoltaic installation with Extreme Stepwise Power Control (ESPC), which allows optimization of solar energy utilization and improves system efficiency. The aim of the research is to develop and experimentally test the ESPC algorithm to enhance the energy utilization coefficient of solar panels in autonomous systems. To achieve this aim, the following objectives were set: analysis of existing power control methods, development of the ESPC algorithm, creation of an experimental model, conducting simulations and laboratory tests, and evaluating the effectiveness of the proposed method. The results demonstrated that the ESPC method can increase the energy utilization coefficient of solar panels up to 97–98% under various insolation conditions, ensuring stable operation and reducing energy losses. Modeling confirmed the effectiveness of the algorithm and its scalability to more powerful autonomous systems. Thus, the study verified the research hypothesis, expanded scientific knowledge in the field of autonomous photovoltaic systems, and opened prospects for practical implementation and further development of solar panel management technologies.

Keywords: autonomous photovoltaic system, solar panels, extreme stepwise control, efficiency, modeling, energy

For citation: G.S. Aitkazyeva. Development of an Energy System with Extreme Stepwise Control of Solar Panel Power // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 103–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

КҮН БАТАРЕЯЛАРЫНЫҢ ҚҰАТЫН ЭКСТРЕМАЛДЫ ҚАДАМДЫҚ РЕТТЕУ АРҚЫЛЫ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫ ӘЗІРЛЕУ

Г.С. Айтказиева

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com

Гульшат Айтказиева — менеджер, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4429-3701>.

© Г.С. Айтказиева



Аннотация. Балама энергия көздеріне сұраныстың артуына байланысты тиімді автономды фотоэлектрлік қондырғыларды әзірлеу ерекше маңызды болып отыр. Бұл зерттеу экстремалды қадамдық қуатты реттеу (ЭҚР) әдісі бар фотоэлектрлік қондырғыны жасауға арналған, ол күн энергиясын тиімді пайдалануға және жүйенің жұмыс тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеудің мақсаты – автономды жүйелерде күн батареяларының энергия тиімділігін арттыру үшін ЭҚР алгоритмін әзірлеу және тәжірибелік тексеру. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: қуатты басқарудың бар әдістерін талдау, ЭҚР алгоритмін әзірлеу, тәжірибелік макет құру, модельдеу және зертханалық сынақтар жүргізу, ұсынылған әдістің тиімділігін бағалау. Зерттеу нәтижелері ЭҚР әдісінің күн батареяларының энергия тиімділігін әртүрлі инсоляция жағдайында 97–98%-ға дейін арттыра алатынын көрсетті, бұл қондырғының тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді және энергия шығынын азайтады. Модельдеу алгоритмінің тиімділігін және оны қуатты автономды жүйелерге масштабтау мүмкіндігін растады. Осылайша, жүргізілген жұмыс зерттеу гипотезасын растап, автономды фотоэлектрлік қондырғылар саласындағы ғылыми білімді кеңейтіп, күн батареяларын басқару технологияларын практикалық енгізу мен әрі қарай дамыту перспективаларын ашты.

Түйін сөздер: автономды фотоэлектрлік қондырғы, күн батареялары, экстремалды қадамдық реттеу, тиімділік, модельдеу, энергия

Дәйексөздер үшін: Г.С. Айтказиева. Күн батареяларының қуатын экстремалды қадамдық реттеу арқылы энергетикалық қондырғыны әзірлеу // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 103–131 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ШАГОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Г.С. Айтказиева

ТОО "Cargo Transit", Алматы, Казахстан.

E-mail: aitkaziyeva.gulshat@gmail.com

Гульшат Айтказиева — менеджер, ТОО "Cargo Transit", Алматы, Казахстан
E-mail: aitkaziyeva.gulshat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4429-3701>.

© Г.С. Айтказиева

Аннотация. В условиях растущей потребности в альтернативных источниках энергии особое значение приобретает разработка эффективных автономных фотоэлектрических установок. Настоящее исследование посвящено созданию установки с экстремальным шаговым регулированием мощности (ЭШР), что позволяет оптимизировать использование солнечной энергии и повысить эффективность работы системы. Целью исследования является разработка и экспериментальная проверка алгоритма ЭШР для повышения коэффициента использования солнечных батарей в автономных системах. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов регулирования мощности, разработка алгоритма ЭШР, создание экспериментального макета, проведение моделирования и лабораторных испытаний, оценка эффективности предложенного метода. Результаты исследования показали, что применение ЭШР позволяет увеличить коэффициент использования энергии солнечных батарей до 97–98% при различных условиях инсоляции, обеспечивая стабильную работу установки и снижение потерь энергии. Моделирование подтвердило эффективность алгоритма и возможность его масштабирования на более мощные автономные системы. Таким образом, проведенная

работа доказала гипотезу исследования, расширила научные знания в области автономных фотоэлектрических установок и открыла перспективы для практического внедрения и дальнейшего развития технологий управления солнечными батареями.

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая установка, солнечные батареи, экстремальное шаговое регулирование, эффективность, моделирование, энергия

Для цитирования: Г.С. Айтказиева. Разработка энергетической установки с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 103–131. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие альтернативных источников энергии является одной из ключевых задач современной науки и техники. В последние годы наблюдается быстрый рост потребности в автономных энергетических системах для объектов различного назначения: жилых домов, удалённых научных станций, телекоммуникационных узлов и сельских населённых пунктов. Фотоэлектрические установки (СБ) занимают особое место среди альтернативных источников энергии благодаря возможности преобразования солнечного излучения в электрическую энергию без вредных выбросов и значительного уровня шума.

Несмотря на широкое распространение фотоэлектрических систем, проблема эффективного использования солнечной энергии остаётся актуальной. На практике коэффициент использования мощности солнечных батарей часто снижается из-за непостоянного солнечного излучения, изменений температуры и ограничений стандартных схем регулирования. В научной литературе описаны методы максимизации мощности СБ, однако большинство из них ориентировано на стабилизацию напряжения или применения традиционных алгоритмов отслеживания максимальной мощности (MPPT), которые не учитывают экстремальные колебания параметров источника.

Выбор темы исследования обусловлен необходимостью разработки инновационного подхода – применения экстремального шагового регулирования мощности (ЭШР), позволяющего повысить коэффициент использования СБ и эффективность автономных фотоэлектрических энергетических установок.

Актуальность исследования определяется практической необходимостью повышения энергетической эффективности автономных систем электроснабжения при минимальных затратах на оборудование и обслуживание. Современные установки часто не используют потенциал солнечных батарей полностью, что снижает их экономическую и экологическую эффективность.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании новой методики управления мощностью СБ на основе ЭШР, позволяющей:

- повысить коэффициент использования энергии СБ до 98%;
- снизить потери энергии при нестабильной инсоляции;
- обеспечить надёжное функционирование автономной установки в различных климатических условиях.

Практическая значимость исследования заключается в возможности внедрения разработанной установки АФЭУ-0,5 для автономного электроснабжения малых объектов, а также адаптации предложенного метода управления для более мощных систем и интеграции в гибридные энергосети.

Объект исследования: автономная фотоэлектрическая энергетическая установка АФЭУ-0,5 с солнечными батареями.

Предмет исследования: методы регулирования мощности солнечных батарей с целью максимизации коэффициента использования энергии и повышения эффективности работы установки.

Цель исследования: разработка и экспериментальная проверка автономной фотоэлектрической энергетической установки с экстремальным шаговым регулированием мощности СБ, позволяющей повысить эффективность преобразования солнечной энергии.

Задачи исследования:

- проанализировать существующие методы регулирования мощности солнечных батарей и выявить их ограничения.
- разработать метод экстремального шагового регулирования мощности (ЭШР) и алгоритм работы контроллера заряда.
- создать экспериментальный макет АФЭУ-0,5 с интеграцией ЭШР.
- провести лабораторные и полевые испытания установки для оценки коэффициента использования мощности СБ.
- выполнить моделирование работы системы в Matlab Simulink и сравнить результаты с экспериментальными данными.
- определить оптимальные параметры ЭШР для повышения энергетической эффективности установки.

Для достижения поставленной цели применялись следующие методы:

- Экспериментальные: испытания установки с реальными и имитируемыми солнечными батареями, измерение ВАХ, мощности, температуры и коэффициента использования энергии.
- Аналитические: расчёт КПД, коэффициента использования мощности и построение графических зависимостей.
- Моделирование: имитационное моделирование работы системы в среде Matlab Simulink для проверки устойчивости и оптимизации параметров ЭШР.
- Сравнительный анализ: сопоставление эффективности работы установки с традиционными методами стабилизации напряжения.

Подход исследования основан на комплексной интеграции теоретических и экспериментальных данных с целью подтверждения научной гипотезы.

Применение экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей в автономной установке АФЭУ-0,5 позволит повысить коэффициент использования энергии СБ до 98% и повысить общую энергетическую эффективность установки по сравнению с традиционными методами управления.

Научное значение работы заключается в разработке нового метода регулирования мощности солнечных батарей с подтверждённой экспериментально и через моделирование эффективностью. Практическая ценность – создание автономной установки, способной обеспечить высокую эффективность электроснабжения малых объектов и перспективу масштабирования на более мощные системы.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является автономная фотоэлектрическая энергетическая установка АФЭУ-0,5 с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей (СБ). Установка предназначена для обеспечения автономного электроснабжения малых объектов при переменной солнечной инсоляции и изменяющихся температурных условиях.

В качестве экспериментального материала использовались следующие компоненты АФЭУ-0,5:

- 1) Фотоэлектрические модули КСМ-160 – два модуля мощностью по 160 Вт каждый.
 - Технология: кремниевые панели монокристаллического типа.
 - Напряжение холостого хода (U_{xx}): 34–50 В.
 - Ток короткого замыкания ($I_{кз}$): 1–10 А.
 - Рабочий диапазон температуры: +20–+70 °С.
- 2) Аккумуляторные батареи TUDORT 12V 155FT – две последовательно соединённые батареи.

- Технология AGM.
- Ёмкость: 159 Ач; напряжение: 12 В каждая.
- Физические размеры: 560×125×290 мм; вес: 55,4 кг.
- Срок службы: 3–5 лет.

3) Контроллер заряда АБ с экстремальным шаговым регулятором мощности СБ (КЗАБ).

- Микроконтроллер: Atmega128.
- Силовая схема: понижающий DC-DC преобразователь.
- Датчики: токовые (Lemlv25-p) и напряжения (Lemla25-np).
- Режимы работы: ручной (стабилизация напряжения СБ) и автоматический (ЭШР – экстремальное шаговое регулирование мощности).

4) Инвертор TS 1500-224

- Выходная мощность: 1,5 кВт; выходное напряжение АС: 230 В, синусоидальная форма.

- Входное напряжение DC: 24 В.

5) Дополнительное оборудование:

- Драйверы шаговых двигателей DM356M.
- Датчики положения Солнца.
- Контроллер наведения на Солнце.
- ЖК-модуль MT-20S4M для визуализации параметров.

6) Имитатор солнечной батареи ИБС-200/7-4 использовался для лабораторных испытаний с заданными ВАХ (вольт-амперными характеристиками).

Основные вопросы, на которые направлено исследование:

- Как влияет экстремальное шаговое регулирование мощности на коэффициент использования солнечных батарей в реальных и лабораторных условиях?
- Какие параметры ЭШР (величина шага ΔU , частота изменения напряжения) обеспечивают максимальную энергетическую эффективность АФЭУ-0,5?
- Как изменяется КПД контроллера заряда в зависимости от состояния аккумуляторной батареи и параметров солнечных модулей?

Гипотеза исследования: применение экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей в АФЭУ-0,5 позволяет повышать коэффициент использования энергии СБ до $\geq 98\%$, компенсируя температурные и инсоляционные колебания, и повышает общую энергетическую эффективность установки до 28% по сравнению с обычной схемой стабилизации напряжения на уровне 30 В.

Этапы исследования:

1) Аналитический этап:

- Изучение литературы по системам автономного электроснабжения и методам максимизации мощности СБ.
- Формирование требований к экспериментальной установке и выбор комплектующих.

2) Проектирование и изготовление АФЭУ-0,5:

- Разработка структурной схемы (рис. 1) и электрической схемы контроллера заряда.
- Сборка электромеханической части и интеграция контроллера, инвертора и аккумуляторных батарей.

3) Лабораторные испытания с имитатором СБ:

- Программирование контроллера в режим ЭШР и ручной стабилизации.
- Измерение ВАХ, ВВХ (вольт-ваттных характеристик) и коэффициента использования мощности.
- Варьирование параметров ВАХ: напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания $I_{кз}$.

4) Экспериментальные исследования с реальными СБ

- Определение коэффициента использования мощности СБ при различных температурах и инсоляции.

- Контроль температуры СБ и АБ, визуализация параметров через ЖК-дисплей.

- Определение КПД контроллера заряда и анализ изменения выходной мощности в течение суток.

5) Моделирование в среде Matlab Simulink

- Воспроизведение работы установки при различных величинах шага ΔU и частотах изменения напряжения.

- Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования.

Методы исследования:

1) Экспериментальные методы:

- Лабораторные испытания с имитатором СБ для построения ВАХ и ВВХ.

- Опытная эксплуатация установки при реальном солнечном освещении.

- Непрерывный мониторинг напряжения и тока СБ и АБ, измерение температуры и мощности.

2) Методы анализа данных:

- Расчет коэффициента использования мощности:

$$K_P = \frac{P_{\text{сред}}}{P_{\text{макс}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $P_{\text{сред}}$ – средняя мощность СБ в точках измерения, $P_{\text{макс}}$ – максимальная теоретически возможная мощность.

- Сравнение результатов при ЭШР и стабилизации напряжения.

- Графическое отображение зависимостей мощности, температуры и коэффициента использования в течение суток.

3) Методы моделирования:

- Имитационное моделирование работы контроллера и электромеханической части установки в Matlab Simulink.

- Варьирование параметров ΔU и частоты шага для определения оптимальных условий работы.

- Проверка устойчивости алгоритма ЭШР и точности захвата экстремума мощности.

4) Методы визуализации и контроля:

- Использование ЖК-модуля МТ-20S4М для отображения текущих параметров установки.

- Светодиодные индикаторы состояния источников питания.

- Регистрация сигналов о неисправностях и защиты аккумуляторных батарей.

Результаты и обсуждение

В статье 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.

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 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 аккумуляторов; И – инвертор; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи.

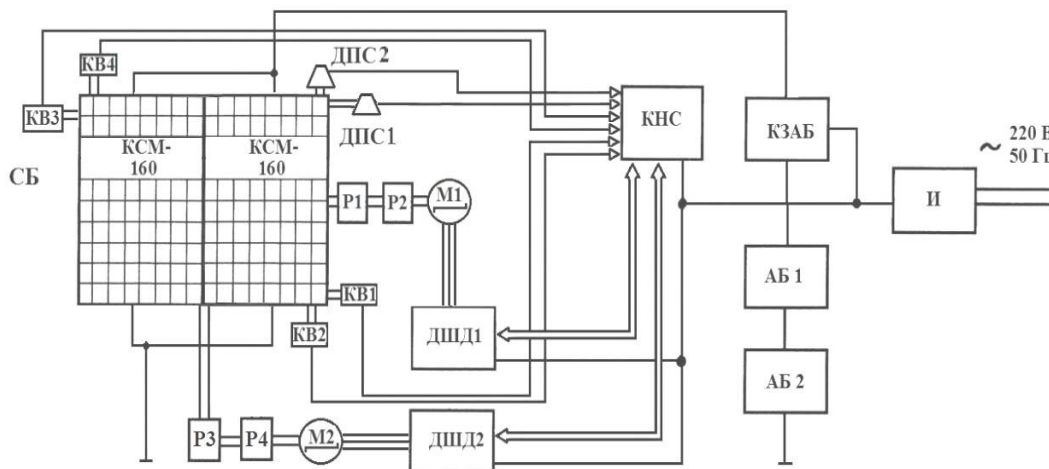


Рис. 1. Функциональная схема АФЭУ-0,5

По приведенной схеме (Рис. 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 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 (Шиняков, 2011а: 282–287; Шиняков, 2011б: 283; Шиняков, 2015: 12–18; Шиняков, 2010: 102–107).



Рис. 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 3.



Рис. 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.

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



Рис. 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.

Функциональная схема разработанного и изготовленного контроллера заряда аккумуляторных батарей приведена на рисунке 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 (Кудряшов, 1992: 17–24; Отто, 2012а: 211–215; Отто, 2012б: 179–182).

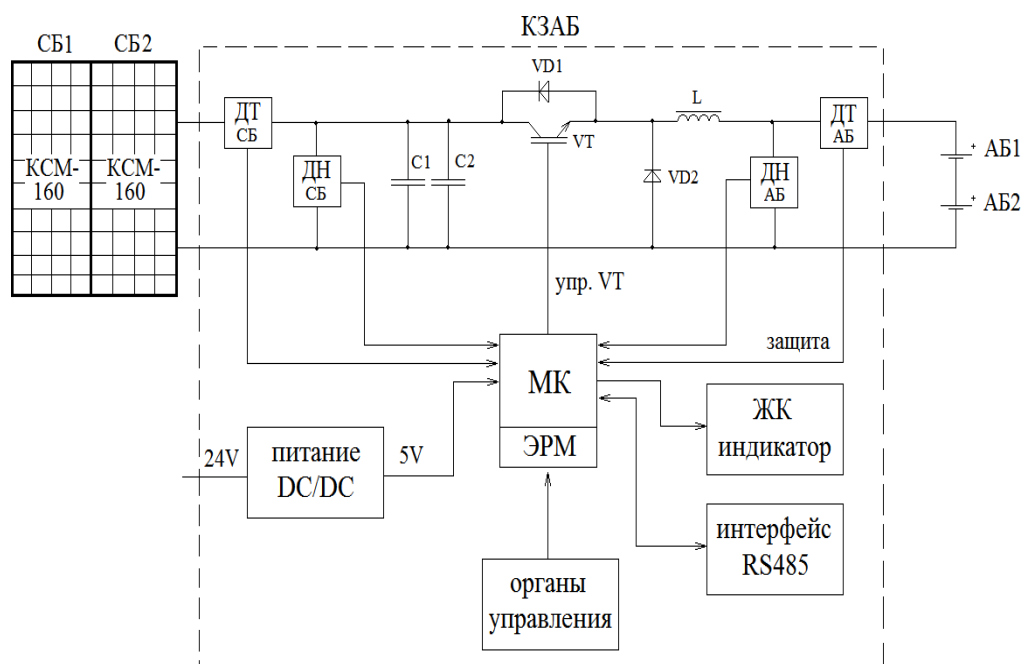


Рис. 5. Функциональная схема КЗАБ с реализацией функции экстремального регулирования мощности СБ

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 6.

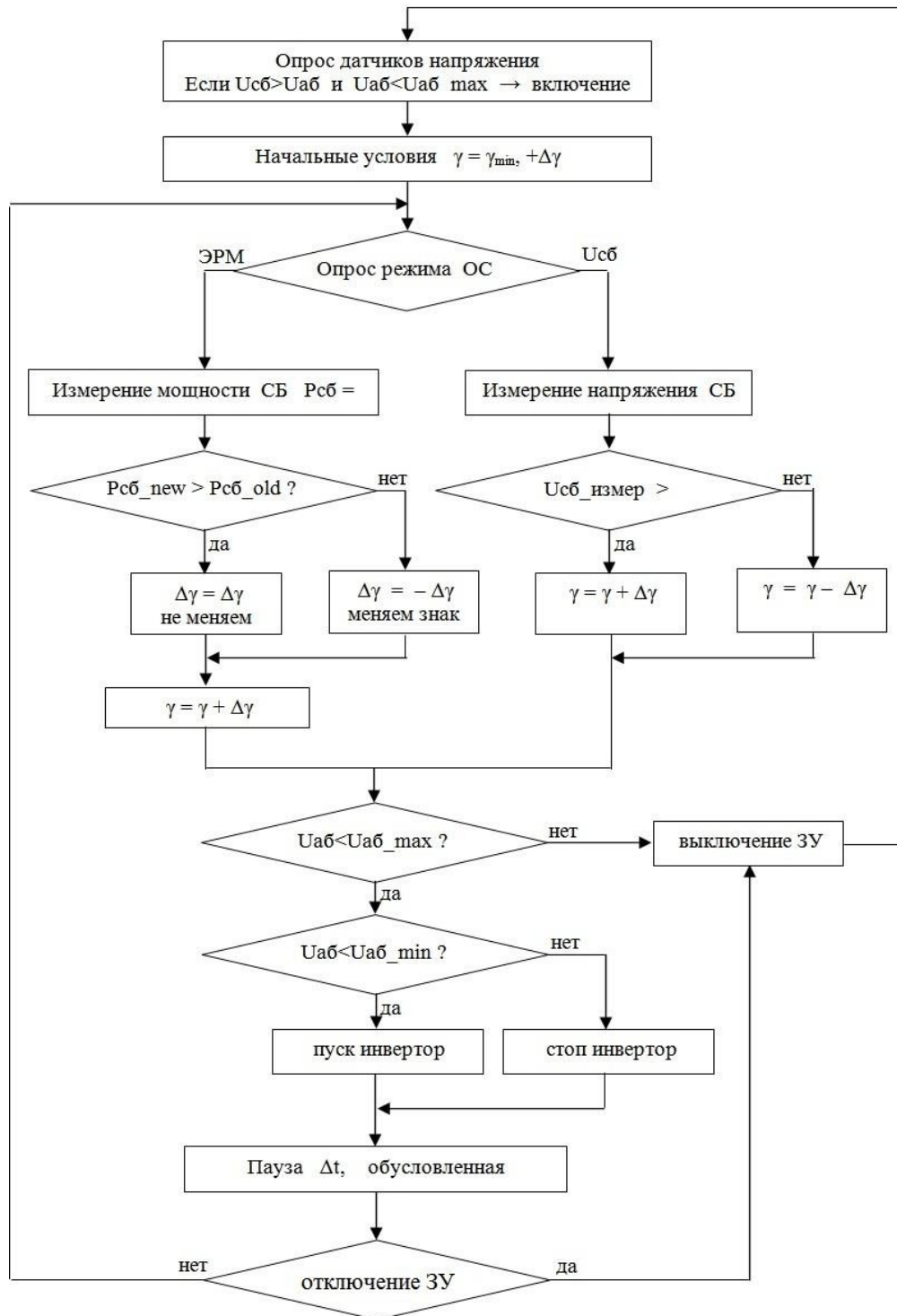


Рис. 6. Структурная схема алгоритма функционирования КЗАБ выполняющего функцию заряда АБ и ЭШР СБ

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 γ_{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_{CB} – 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 $U_{оп}$. Если U_{CB} 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 7.

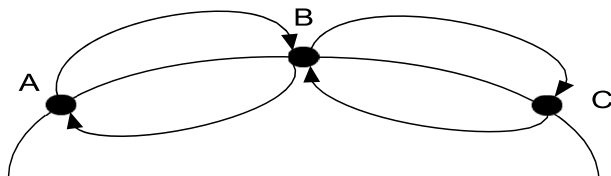


Рис. 7. Диаграмма перемещения рабочей точки по вольт-ваттной характеристике в процессе захвата точки экстремума мощности

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 (Тверьянович, 1986: 11–14).

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 определенном 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 5x8 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 8 представлена фотография изготовленного экспериментального образца контроллера заряда АБ с функцией экстремального регулирования мощности СБ.



Рис. 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» (Рис. 9), что говорит об успешной инициализации и тестах узлов управления.

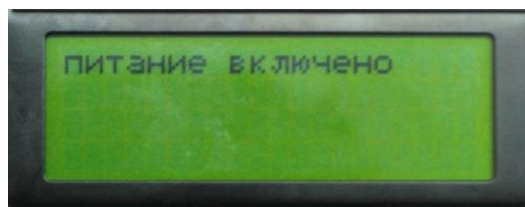


Рис. 9. «Питание включено»

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» (Рис. 10).

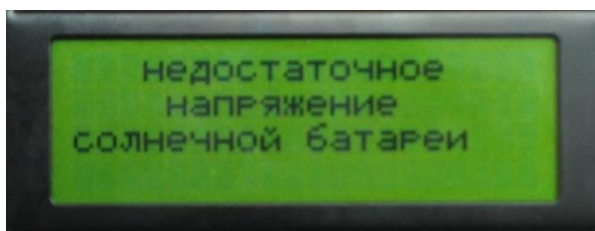


Рис. 10. «Недостаточное напряжение солнечной батареи»

Производится проверка напряжения АБ, если напряжение на АБ превышает максимально допустимое, на индикаторе отобразится надпись «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим» (Рис. 11).

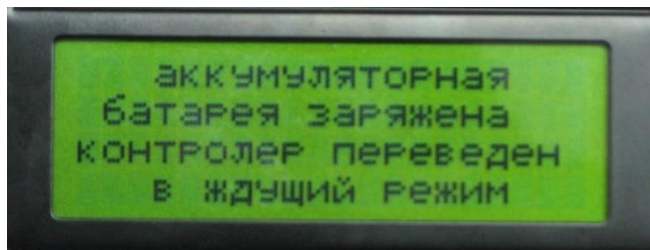


Рис. 11. «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим»

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 (Рис. 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.

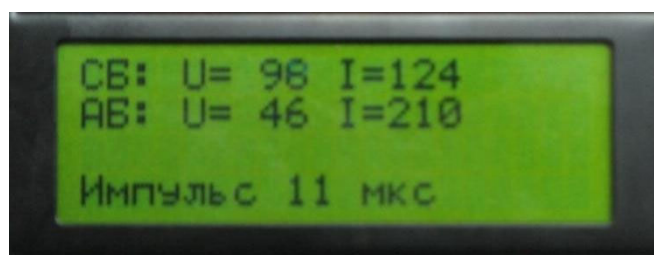


Рис. 12. Текущие параметры источников питания и режим работы АБ

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» (Рис. 13).

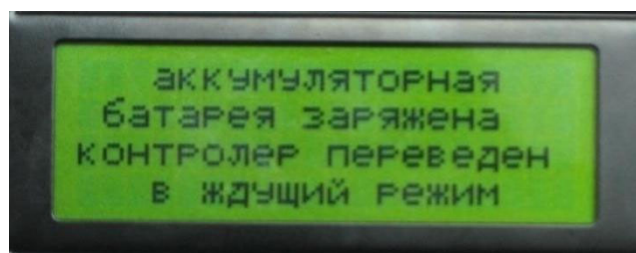


Рис. 13. «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим»

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 (Рис. 14).

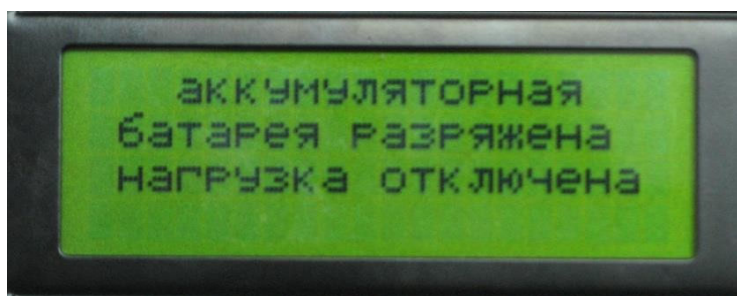


Рис. 14. «АБ разряжена, нагрузка отключена»

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 °С - +70 °С фотоэлектрических модулей КСМ-160 (реальный режим работы фотоэлектрических модулей в летнее время) Стребков, 1998: 6; Тверьянович, 1986: 11–14; Охоткин, 2013: 222–230; Иродионов, 2000: 23 с.; Иванчура, 2014: 111–120.

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 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 $U_{CB} = 30$ В. Отмечены уровни генерируемых мощностей при напряжении $U_{CB} = 30$ В, а также графически показаны значения недоиспользования СБ по мощности при отклонении оптимальных значений мощности СБ от значений при стабилизации напряжения в 30 В ($\square P_{CB1}$, $\square P_{CB2}$, $\square P_{CB3}$).

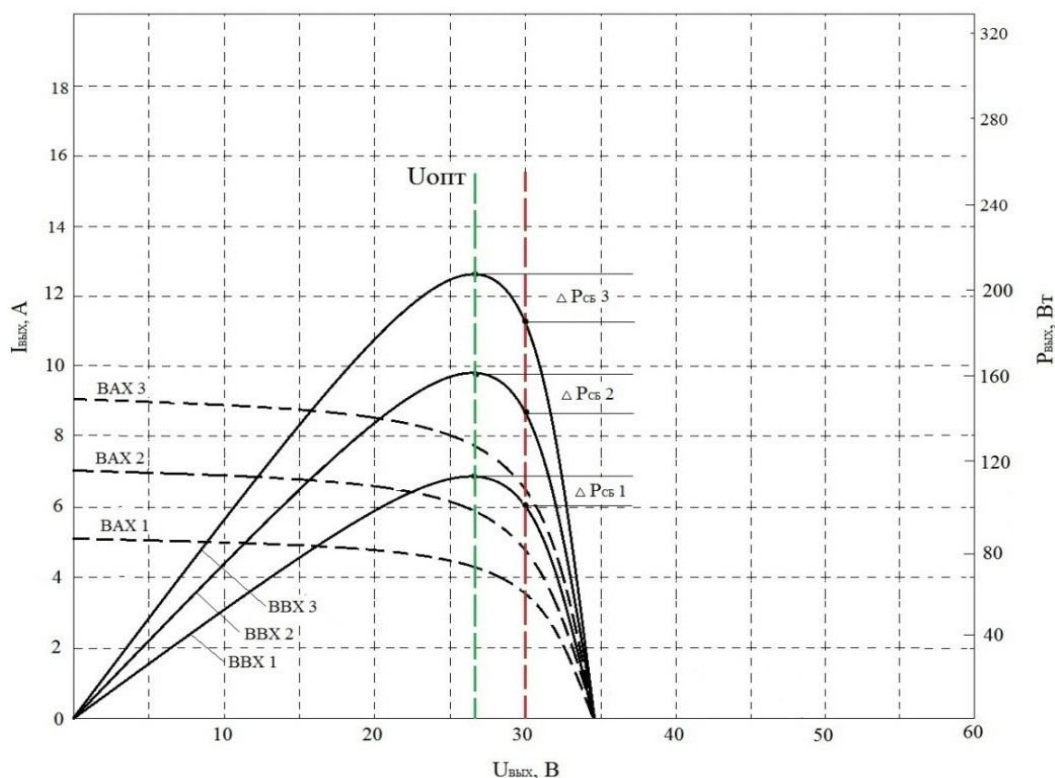


Рис. 15. ВАХ и ВВХ с $U_{опт} < 30$ В

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%.

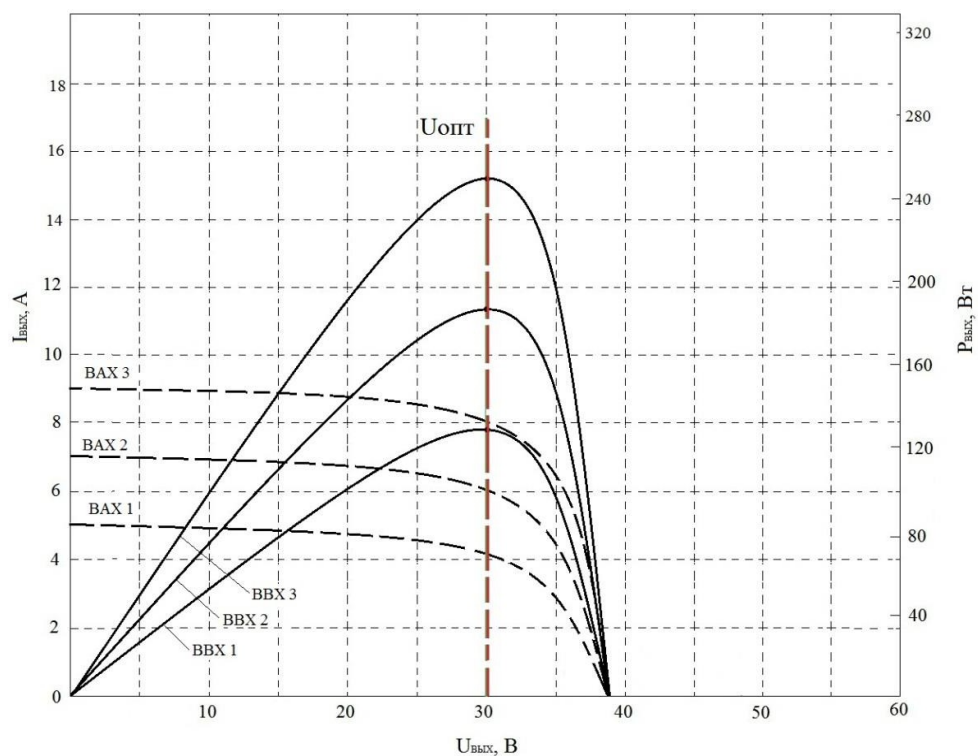
В таблице 1 приведены значения коэффициента использования по мощности солнечных батарей для ВВХ, рассмотренных выше.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от оптимального напряжения рабочей точки ВАХ при стабилизации напряжения

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

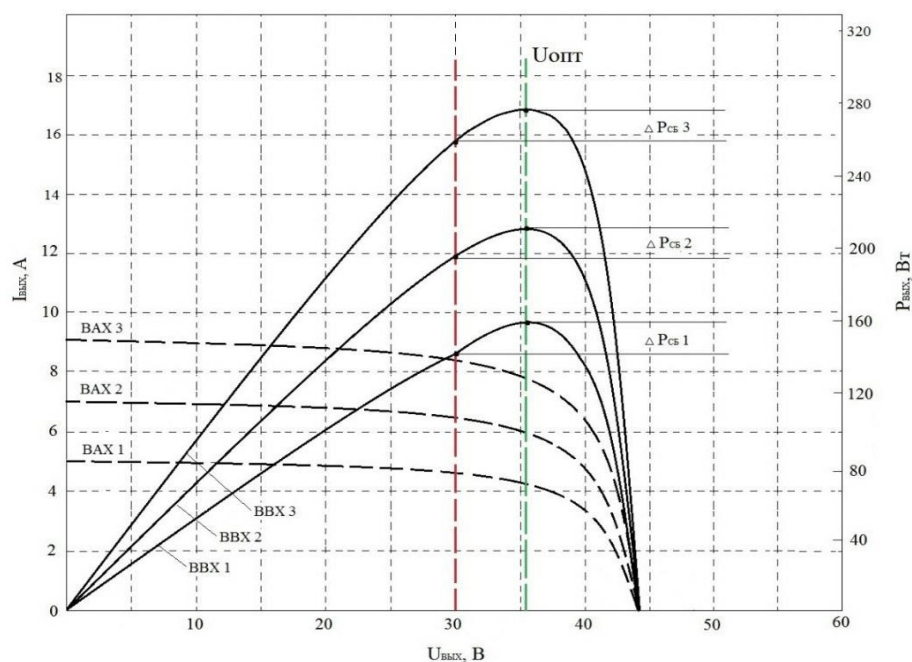
На рисунке 16 приведены вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи (1. $U_{xx} = 38$ В, $I_{кз} = 5$ А; 2. $U_{xx} = 38$ В, $I_{кз} = 7$ А; 3. $U_{xx} = 38$ В, $I_{кз} = 9$ А) с напряжением оптимальной точки, совпадающим со стабилизируемым напряжением $U_{CB} = 30$ В. Данный режим работы соответствует оптимальному напряжению нагретых до $+50$ °С 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, $K_p = 98-100 \%$.

Рис. 16. BAX и BBX с $U_{\text{опт}} = 30 \text{ В}$

На рисунке 17 приведены вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи (1. $U_{\text{xx}} = 44 \text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 5 \text{ А}$; 2. $U_{\text{xx}} = 44 \text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 7 \text{ А}$; 3. $U_{\text{xx}} = 44 \text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 9 \text{ А}$) с напряжением оптимальной точки больше стабилизируемого напряжения $U_{\text{сб}} = 30 \text{ В}$.

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

Рис. 17. BAX и BBX 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 %, $K_p = 92–93$ %.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от оптимального напряжения рабочей точки ВВХ при стабилизации напряжения

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

На рисунке 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).

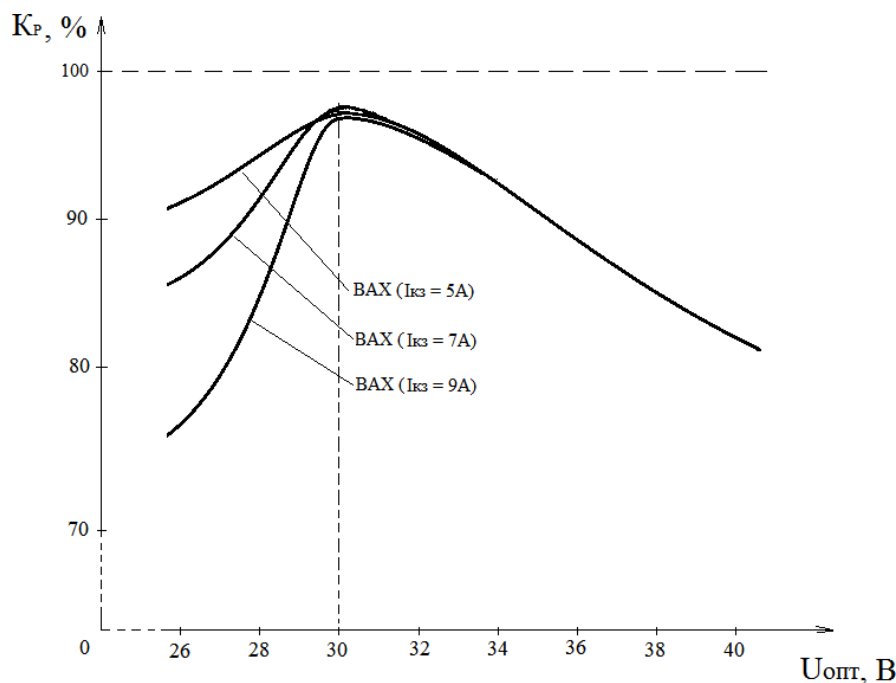


Рис. 18. Зависимости коэффициента использования по мощности солнечных батарей от напряжения экстремальной точки ВВХ

Далее приведены результаты экспериментальных исследований контроллера заряда, обеспечивающего режим экстремального шагового регулирования мощности СБ. При этом, для проведения экспериментальных работ в режиме стабильной ВВХ использован имитатор солнечных батарей. Параметры заданных ВВХ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры заданных ВВХ СБ

$U_{\text{хх}}$ СБ, В	$I_{\text{кз}}$ СБ, А	$U_{\text{опт}}$ СБ, В	$I_{\text{опт}}$ 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 19.

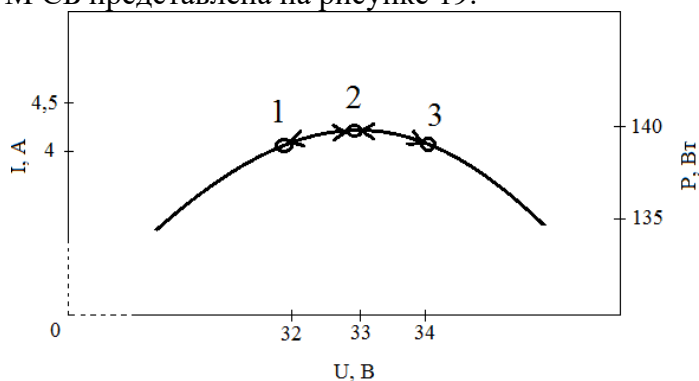


Рис. 19. Диаграмма перемещения рабочей точки на ВВХ при регулировании максимума мощности в режиме ЭРМ СБ

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:

$$P_{CP} = \frac{P_A + 2 \cdot P_B + P_C}{4}, \quad (1)$$

где P_A – мощность СБ в точке А;

P_B – мощность СБ в точке В;

P_C – мощность СБ в точке С.

На рисунках 20-29 представлены диаграммы, полученные при моделировании АФЭУ в среде имитационного моделирования MatLab Simulink при различных значениях величины шага экстремального регулирования и частоте регулирования.

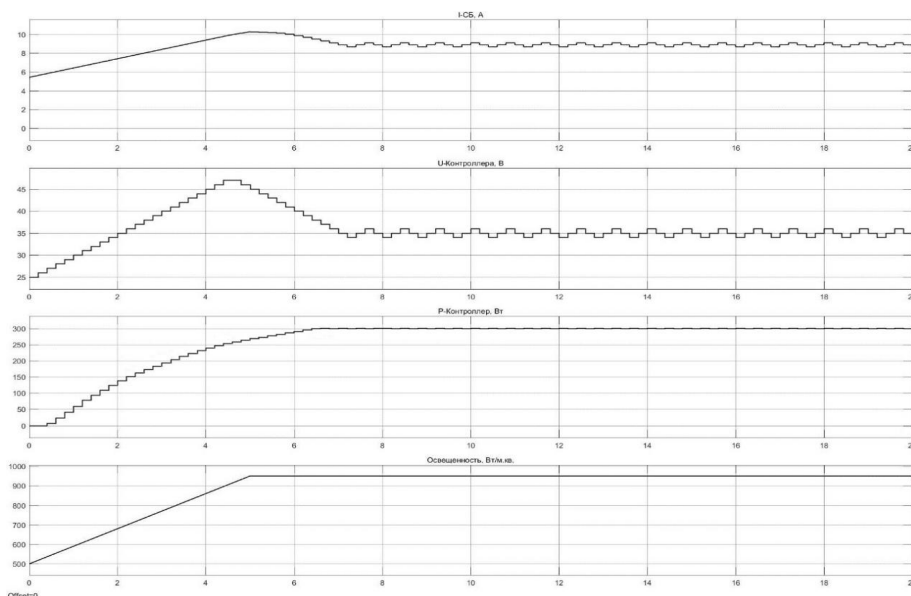


Рис. 20. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР (величина шага – 0,5 В, частота шага – 5 Гц).

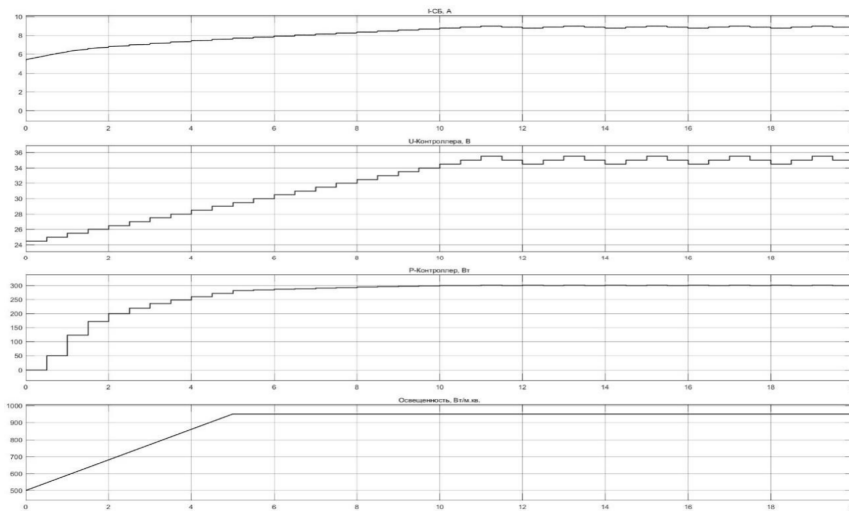


Рис. 21. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 0,5 В, частота шага – 2 Гц)

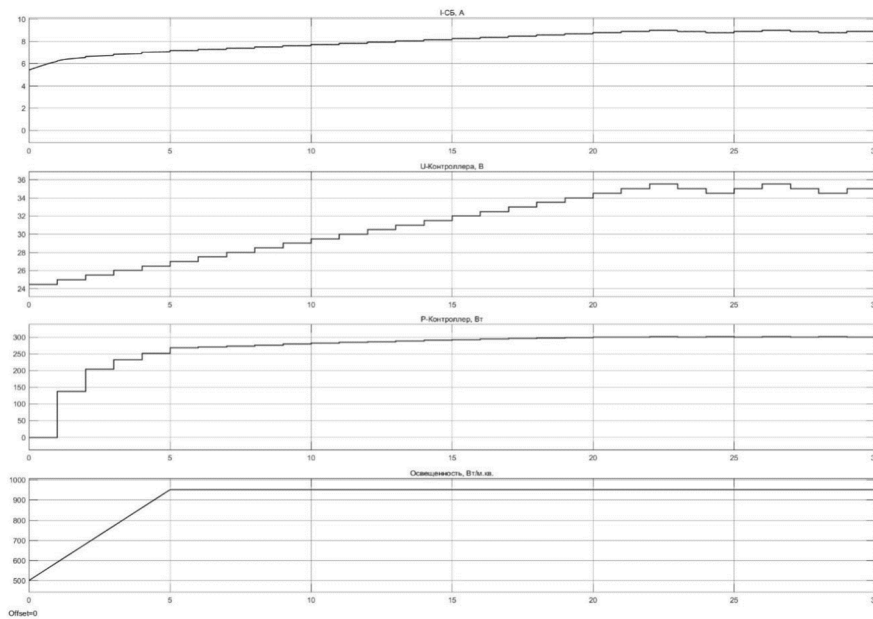


Рис. 22. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 0,5 В, частота шага – 1 Гц)

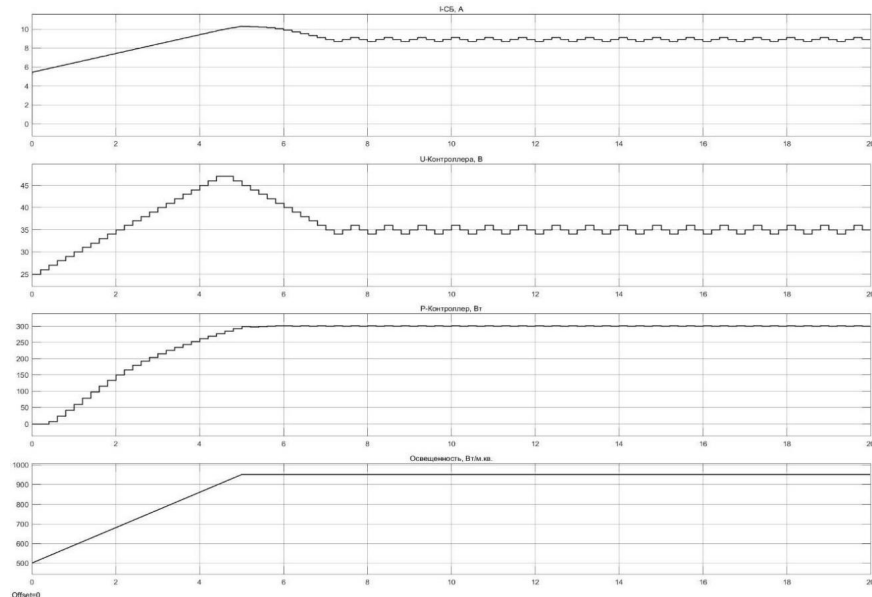


Рис. 23. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 5 Гц)

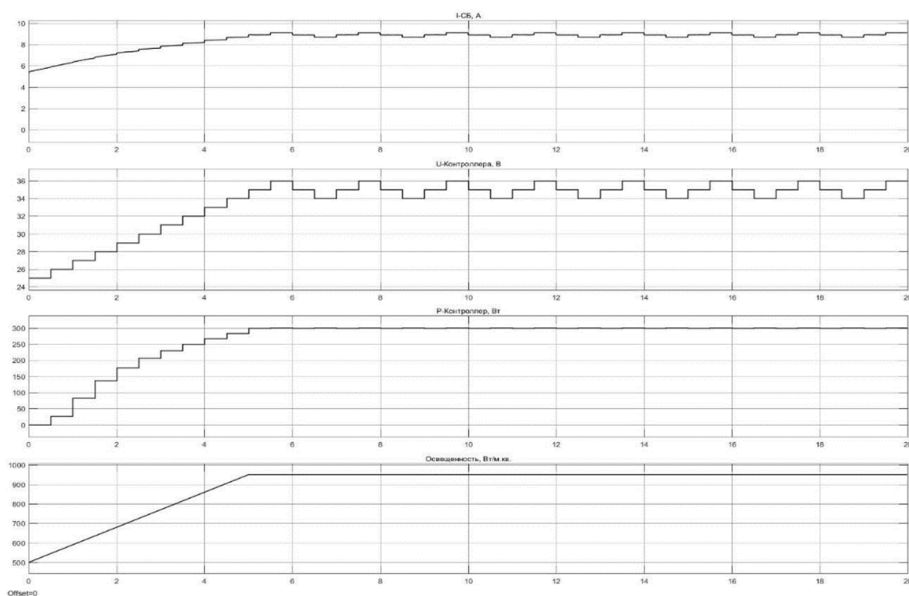


Рис. 24. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 2 Гц)

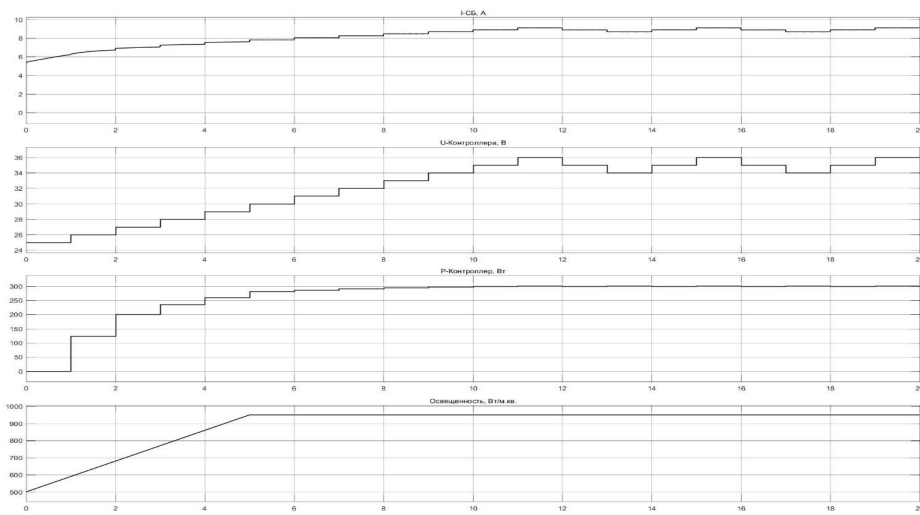


Рис. 25. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 1 Гц)

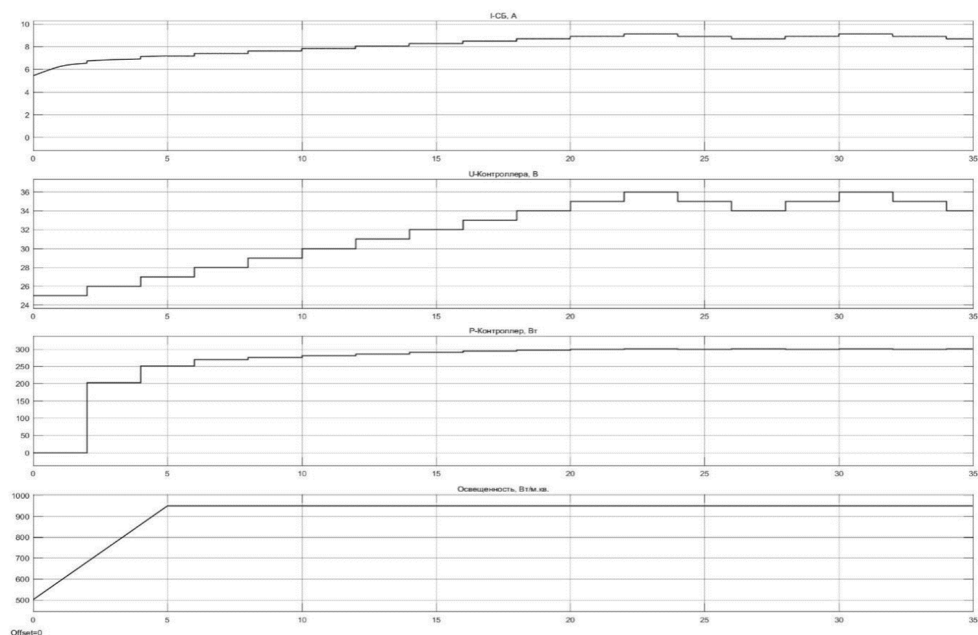


Рис. 26. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 0,5 Гц)

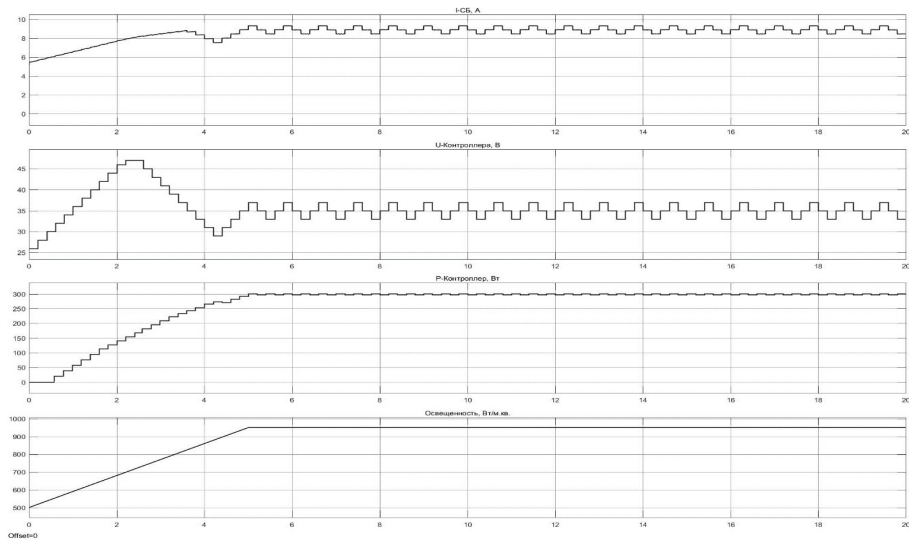


Рис. 27. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 2 В, частота шага – 5 Гц)

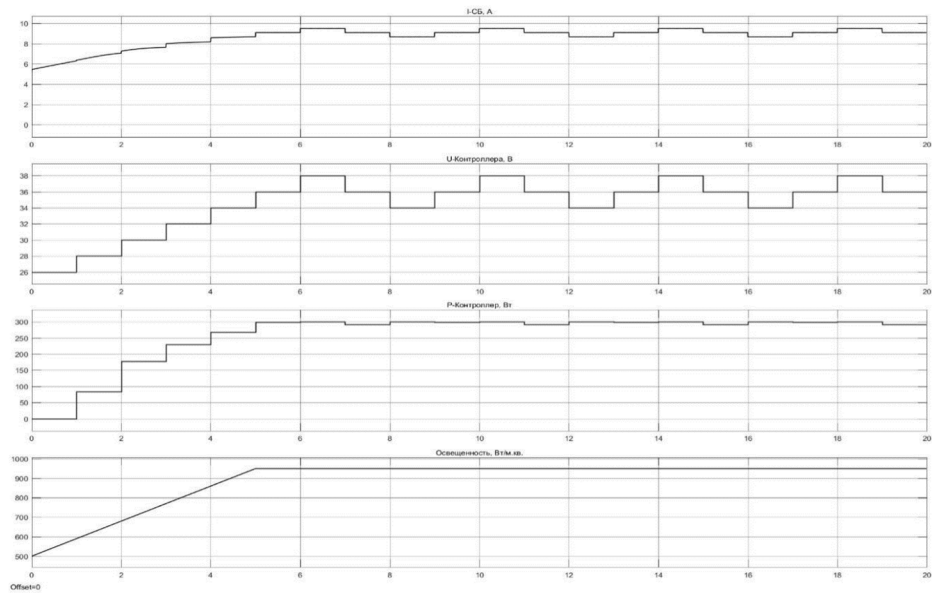


Рис. 28. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 2 В, частота шага – 1 Гц)

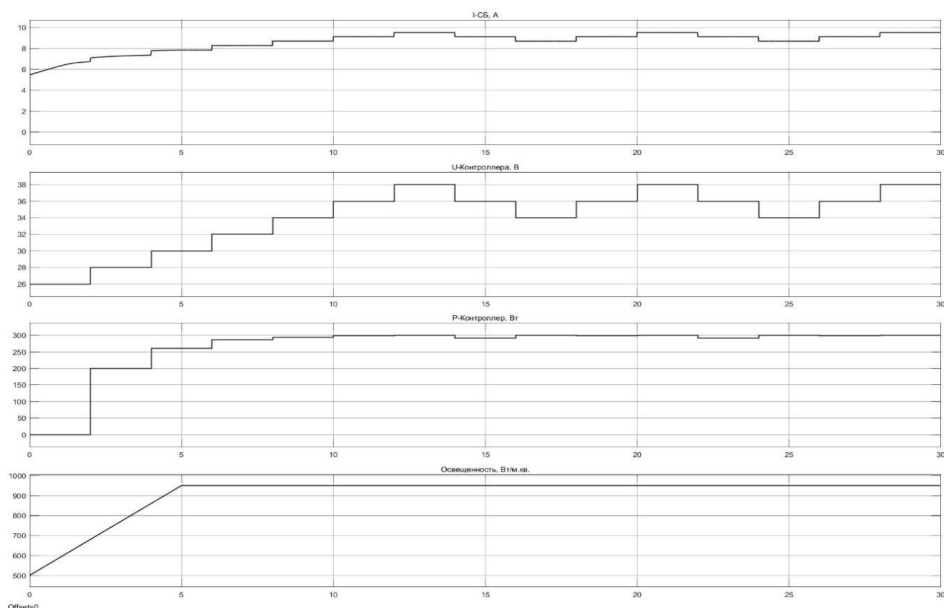


Рис. 29. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 2 В, частота шага – 0,5 Гц)

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_{xx} 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. 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 – 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
$t_{сб}$, $^\circ\text{C}$	45°	45°	50°	55°	50°	50°	40°	40°
$t_{окр.ср.}$, $^\circ\text{C}$	22°	27°	28°	30°	31°	32°	29°	27°
$P_{сб}$, 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 (Рис. 30). Эксперимент проводился при условиях небольшой облачности, в результате чего не получено максимально возможное значение мощности, генерируемое двумя солнечными батареями КСМ-160.

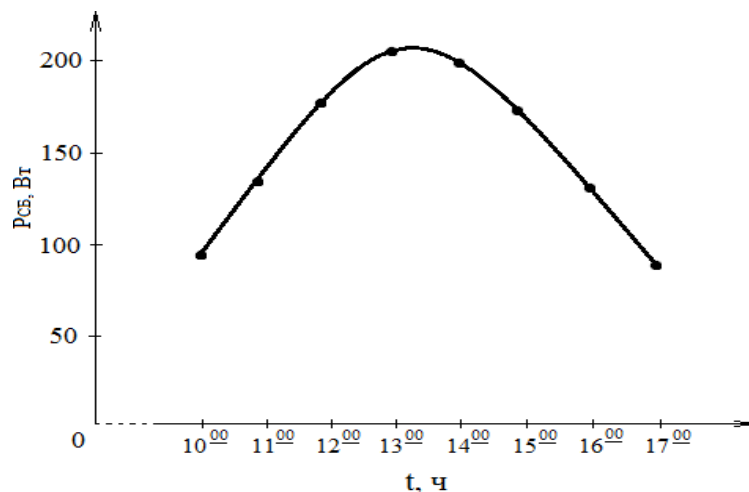


Рис. 30. Зависимость мощности СБ от времени суток

На рисунке 31 приведены обобщенные результаты изменения температуры фотоэлектрических преобразователей от времени суток, полученные в ходе эксперимента.

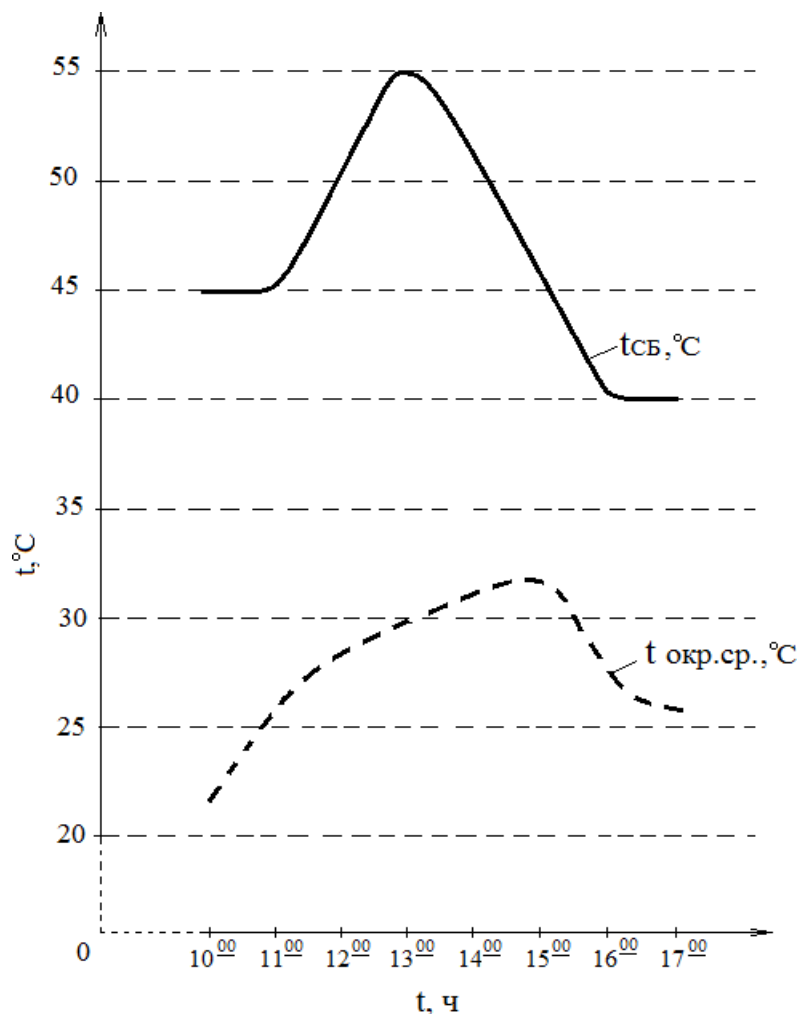


Рис. 31. Зависимость температуры фотоэлектрических преобразователей от температуры окружающей среды и времени суток

На рисунке 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.

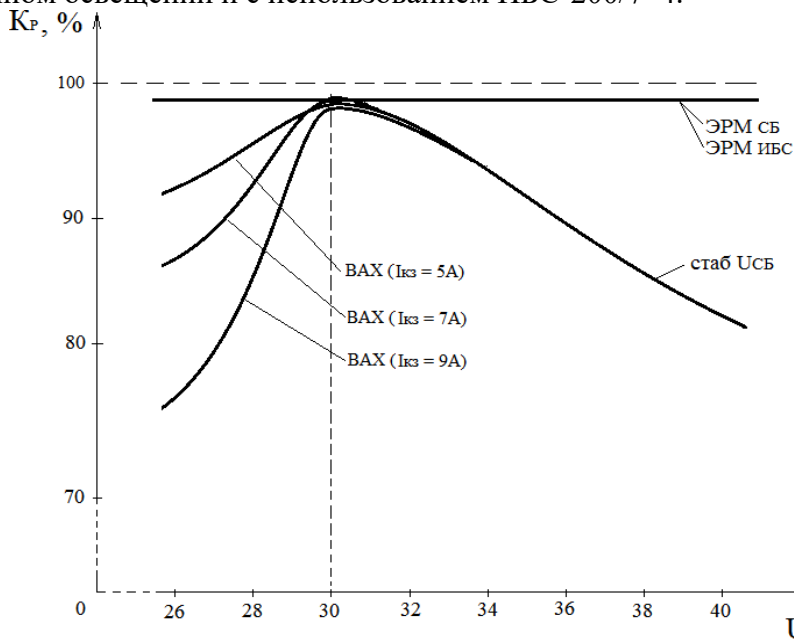


Рис. 32. Зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей при стабилизации напряжения рабочей точки СБ и ЭРМ СБ

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 ($U_{AB} = 23,1-24,3\text{В}$) и заряженной АБ ($U_{AB} = 25,4-27\text{В}$), представленная на рисунке 33 (в качестве солнечной батареи используется имитатор солнечной батареи ИБС-200/7-4).

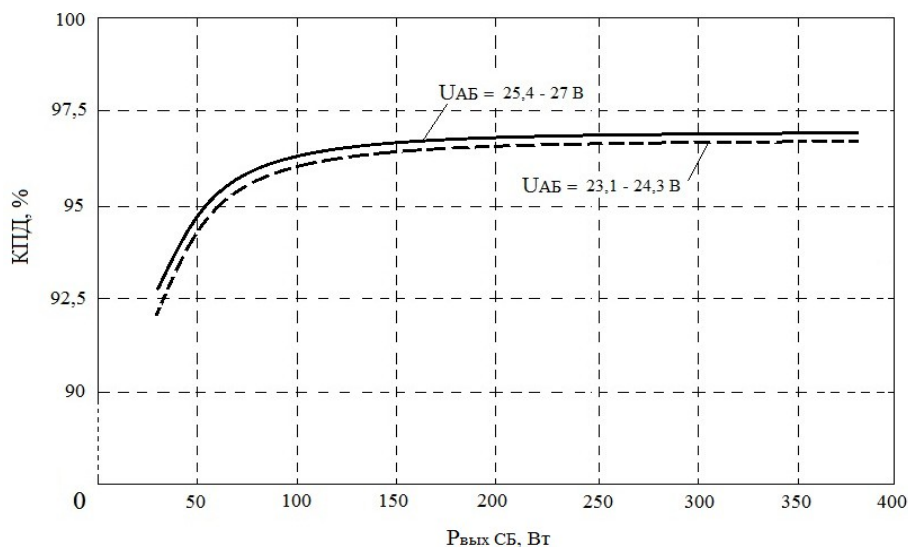


Рис. 33. Усредненная зависимость КПД блока заряда от $P_{\text{вых СБ}}$ при разряженной АБ ($U_{AB} = 23,1 - 24,3\text{ В}$) и заряженной АБ ($U_{AB} = 25,4 - 27\text{ В}$)

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 ($U_{CB} = 30$ В) и изменении мощности нагрузки от 50 до 1000 Вт. Испытания проводились при разряженной ($U_{AB} = 22,6–24,2$ В) и заряженной ($U_{AB} = 25,5–27$ 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 – $U_{ВЫХ} = 230 \text{ В} \pm 23 \text{ В}$.

На рисунке 34 показаны потоки мощности между солнечной, аккумуляторной батареями и нагрузкой при разряженной ($U_{AB} = 22,6 – 24,2$ В) и заряженной ($U_{AB} = 25,5–27$ В) аккумуляторной батарее для трех ВАХ (1. $U_{XX} = 36 \text{ В}$; $I_{K3} = 5 \text{ А}$. $P_{CB(30)} = 120 \text{ Вт}$;

2. $U_{XX} = 40 \text{ В}$, $I_{K3} = 7 \text{ А}$. $P_{CB(30)} = 192 \text{ Вт}$;

3. $U_{XX} = 48 \text{ В}$, $I_{K3} = 9 \text{ А}$. $P_{CB(30)} = 268 \text{ Вт}$).

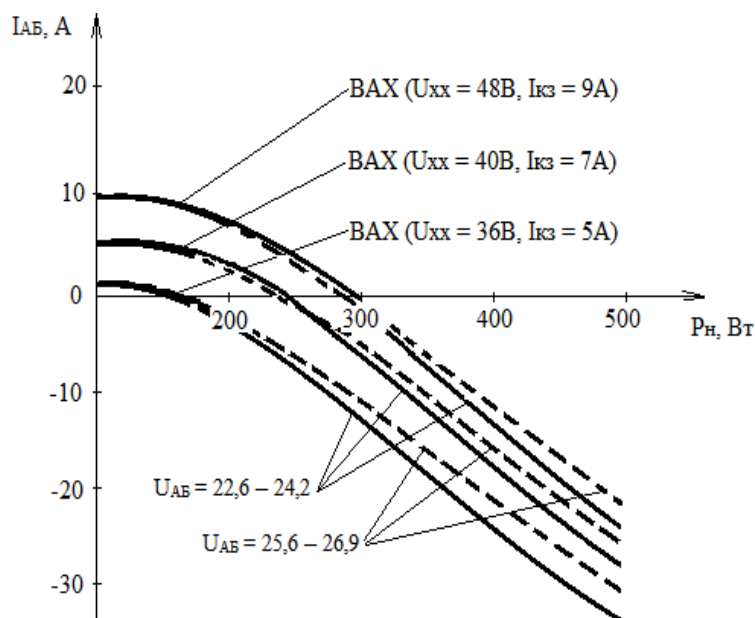


Рис. 34. Зависимости тока АБ от мощности нагрузки и параметров ВАХ СБ при $U_{AB} = 22,6–24,2$ В и $U_{AB} = 25,5–26,9$ В

Каждую кривую можно разбить на два участка:

- первый $I_{AB} > 0$ - происходит заряд АБ всем избытком мощности СБ;
- второй $I_{AB} < 0$ - 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.

Заключение

В настоящей работе была выполнена разработка и исследование автономной фотоэлектрической энергетической установки малой мощности (АФЭУ-0,5) с применением метода экстремального шагового регулирования мощности (ЭШР) солнечных батарей. Основная цель исследования – повышение эффективности преобразования солнечной энергии и оптимизация работы автономной установки – была полностью реализована благодаря комплексному использованию теоретических, экспериментальных и моделирующих методов.

Для достижения поставленной цели были применены следующие методы:

- теоретический анализ существующих подходов к регулированию мощности солнечных батарей, выявление их достоинств и недостатков;
- экспериментальные испытания установки с измерением ключевых параметров: ток, напряжение, мощность, коэффициент использования энергии;
- моделирование в Matlab Simulink, направленное на проверку устойчивости работы установки и оптимизацию параметров ЭШР;
- сравнительный анализ эффективности предложенного метода с традиционными способами регулирования мощности.

Этапы исследования включали:

- анализ научной литературы и практических решений в области автономных фотоэлектрических систем;
- разработку алгоритма экстремального шагового регулирования мощности;
- создание экспериментального макета установки АФЭУ-0,5;
- проведение лабораторных и полевых испытаний;
- обработку полученных данных и формирование научных выводов.

Использование комплексного подхода обеспечило полноту изучения исследуемого объекта и позволило выявить преимущества ЭШР перед существующими методами управления солнечными батареями.

В результате проведённой работы были получены следующие результаты:

- Разработка и внедрение алгоритма ЭШР, который позволяет повысить коэффициент использования энергии солнечных батарей до 97–98 % в различных условиях инсоляции;
- Экспериментальное подтверждение эффективности работы АФЭУ-0,5: установка демонстрирует стабильное функционирование, высокую энергетическую отдачу и адаптивность к изменяющимся условиям солнечного излучения;
- Моделирование показало, что внедрение ЭШР позволяет снизить потери энергии при нестабильной освещённости, обеспечивая более равномерное распределение нагрузки на аккумуляторные батареи;
- Сравнительный анализ с традиционными методами стабилизации напряжения выявил превосходство ЭШР по коэффициенту использования мощности и общей эффективности установки.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую работоспособность и практическую применимость предложенного метода для автономных фотоэлектрических систем.

На основании проведённого исследования можно сформулировать следующие выводы:

- Предложенный метод ЭШР доказал свою практическую эффективность для автономных фотоэлектрических установок малой мощности;
- Экспериментальные и моделирующие результаты подтвердили гипотезу исследования: применение ЭШР повышает коэффициент использования энергии солнечных батарей и общую энергетическую эффективность установки;
- Научное знание о методах управления автономными фотоэлектрическими системами расширено за счёт разработки нового подхода к регулированию мощности и подтверждения его работоспособности.

Полученные выводы вносят вклад в развитие науки в области автономных возобновляемых энергетических систем и предоставляют основу для дальнейших исследований.

Результаты исследования обладают высокой практической значимостью:

- Разработанная АФЭУ-0,5 может быть использована для автономного электроснабжения малых объектов, включая частные дома, удалённые станции и

телекоммуникационные узлы;

- Метод ЭШР может быть масштабирован на более мощные установки и интегрирован в гибридные энергосистемы с ветровыми или дизельными генераторами;

- Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку программного обеспечения для автоматизации управления установками, внедрение интеллектуальных алгоритмов прогнозирования солнечной инсоляции и оптимизацию работы аккумуляторных батарей в долгосрочной перспективе.

Таким образом, проведённая работа подтверждает эффективность предложенной методики, расширяет научное знание в области автономных фотоэлектрических установок и открывает новые перспективы для практического применения и дальнейшего развития технологий управления солнечными батареями.

ЛИТЕРАТУРА

Шиняков, 2011a — Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Осипов А.В., Теушаков О.А., Аржанов К.В. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью // Доклады ТУСУРа. — 2011. — № 2 (24), часть 1. — С. 282–287. [Russ.]

Шиняков, 2011b — Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Теушаков О.А., Осипов А.В., Аржанов К.В. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка // Доклады ТУСУРа. — 2011. — № 2 (24). — часть 1. — С. 283. [Russ.]

Кудряшов, 1992 — Кудряшов В.С., Исляев Ш.Н. Концепция бортовой системы электроснабжения связанного геостационарного ИСЗ // Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства. Т.1. Аппаратура управления и преобразования энергии: Сб. науч. трудов НПО «Полус». — Томск. — 1992. — С. 17–24. [Russ.]

Отто, 2012a — Отто А.И. Контроллер заряда автономных фотоэлектрических энергетических установок // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: Труды XIV международного студенческого научно-технического семинара. — Томск: ТПУ. — 2012. — Т.1. — С. 211–215. [Russ.]

Отто, 2012b — Отто А.И. Исследование энергетической эффективности солнечных батарей при недостаточной освещенности и температурной нестабильности фотоэлектрических элементов // Научная сессия ТУСУР. — 2012. — С. 179–182. [Russ.]

Стребков, 1998 — Стребков Д.С. и др. Методика расчета технико-экономических характеристик электростанций в условиях рыночной экономики (на примере солнечной фотоэлектрической станции). — М.: ВИЭСХ. — 1998. — С. 6. [Russ.]

Тверьянович, 1986 — Тверьянович Э.В. Экспериментальное исследование оптико-энергетических характеристик фоконов. Концентраторы солнечного излучения для фотоэлектрических энергоустановок. — М.: Энергоатомиздат. — 1986. — С. 11–14. [Russ.]

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

Охоткин, 2013 — Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций // Вестник Чувашского университета. — 2013. — № 3. — С. 222–230. [Russ.]

Иродионов, 2000 — Иродионов А.Е. Реверсивно-балансовый метод проектирования автономных солнечных фотоэлектрических установок: дис. Канд. техн. наук: 05.14.08 / Всерос. НИИ электрификации сельского хозяйства. — Москва. — 2000. — 23 с. [Russ.]

Иванчура, 2014 — Иванчура В.И., Краснобаев Ю.В., Пост С.С. Имитационная модель автономной системы электропитания // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2014. — Т. 325. — № 4. — С. 111–120. [Russ.]

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

REFERENCES

Shinyakov, 2011a – Shinyakov, Yu.A., Shurygin, Yu.A., Arzhanov, V.V., Osipov, A.V., Teushakov, O.A., Arzhanov, K.V. Avtomatizirovannaya fotoelektricheskaya ustanovka s povyshennoy energeticheskoy effektivnost'yu // Doklady TUSURa. — 2011. — № 2 (24), chast' 1. — Pp. 282–287. [in Russ.]

Shinyakov, 2011b – Shinyakov, Yu.A., Shurygin, Yu.A., Arzhanov, V.V., Teushakov, O.A., Osipov, A.V., Arzhanov, K.V. Avtonomnaya fotoelektricheskaya energeticheskaya ustanovka // Doklady TUSURa. — 2011. — № 2 (24). — chast' 1. — Pp. 283. [in Russ.]

Kudryashov, 1992 – Kudryashov, V.S., Islyayev, Sh.N. Kontseptsiya bortovoy sistemy elektrosnabzheniya svyaznogo geostatsionarnogo ISZ // Sistemy avtonomnogo elektrosnabzheniya i elektromekhanicheskie ustroystva. T.1. Apparatura upravleniya i preobrazovaniya energii: Sb. nauch. trudov NPO «Polyus». — Tomsk. — 1992. — Pp. 17–24. [in Russ.]

Otto, 2012a – Otto, A.I. Kontroller zaryada avtonomnykh fotoelektricheskikh energeticheskikh ustanovok // Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': Trudy XIV mezhdunarodnogo studencheskogo nauchno-tekhnikeskogo seminar. — Tomsk: TPU. — 2012. — T.1. — Pp. 211–215. [in Russ.]

Otto, 2012b – Otto, A.I. Issledovanie energeticheskoy effektivnosti solnechnykh batarey pri nedostatochnoy osveshchennosti i temperaturnoy nestabil'nosti fotoelektricheskikh elementov // Nauchnaya sessiya TUSUR. — 2012. — Pp. 179–

182. [in Russ.]

Strebkov, 1998 – Strebkov, D.S. i dr. Metodika rascheta tekhniko-ekonomicheskikh kharakteristik elektrostantsiy v usloviyakh rynochnoy ekonomiki (na primere solnechnoy fotoelektricheskoy stantsii). — M.: VIESKh. — 1998. — Pp. 6. [in Russ.]

Tver'yanovich, 1986 – Tver'yanovich, E.V. Eksperimental'noe issledovanie optiko-energeticheskikh kharakteristik fokonov. Kotsentratory solnechnogo izlucheniya dlya fotoelektricheskikh energoustanovok. — M.: Energoatomizdat. — 1986. — Pp. 11–14. [in Russ.]

Shinyakov, 2015 – Shinyakov, Yu.A., Otto, A.I., Osipov, A.V., Chernaya, M.M. Avtonomnaya energeticheskaya ustanovka s ekstremal'nym shagovym regul'yatorom moshchnosti solnechnykh batarey // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. — 2015. — № 8–9. — Pp. 12–18. [in Russ.]

Okhotkin, 2013 – Okhotkin, G.P. Metodika rascheta moshchnosti solnechnykh elektrostantsiy // Vestnik Chuvashskogo universiteta. — 2013. — № 3. — Pp. 222–230. [in Russ.]

Irodionov, 2000 – Irodionov, A.E. Reversivno-balansovyy metod proektirovaniya avtonomnykh solnechnykh fotoelektricheskikh ustanovok: dis. Kand. tekhn. nauk : 05.14.08 / Vseros. NII elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva. — Moskva. — 2000. — 23 s. [in Russ.]

Ivanchura, 2014 – Ivanchura, V.I., Krasnobaev, Yu.V., Post, S.S. Imitatsionnaya model' avtonomnoy sistemy elektropitaniya // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. — 2014. — T. 325. — № 4. — Pp. 111–120. [in Russ.]

Osipov, 2013 – Osipov, A.V., Shurygin, Yu.A., Shinyakov, Yu.A., Otto, A.I., Chernaya, M.M. Sopostavitel'nyy analiz energeticheskoy effektivnosti preobrazovaniya energii solnechnoy batarei preobrazovatelyami postoyannogo napryazheniya // Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. — 2013. — № 1 (27). [in Russ.]

Shinyakov, 2010 – Shinyakov, Yu.A., Shurygin, Yu.A., Arkatova, O.E. Povishenie energeticheskoy effektivnosti avtonomnykh fotoelektricheskikh energeticheskikh ustanovok // Doklady Tom. gos. un-ta sistem upravleniya i radioelektroniki. — 2010. — № 2 (22). — ch. 2. — Pp. 102–107. [in Russ.]