

УДК 621.311.002

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОТЕПЛЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ

Лукутин Борис Владимирович<sup>1</sup>,  
lukutin48@mail.ru

Шандарова Елена Борисовна<sup>1</sup>,  
shandarovaelena@mail.ru

Аль-Мажди Каррар Хамид<sup>1</sup>,  
karrar.almussawi.87@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы определяется возрастающим спросом на энергию, особенно на экологически чистую. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию и совершенствованию возобновляемых источников энергии. Производство электроэнергии с использованием фотоэлектростанций весьма перспективно в районах с высокой инсоляцией, где централизованные энергетические системы недоступны, или в случае, когда доступная электроэнергия обходится дорого. Однако высокая стоимость оборудования фотоэлектростанций ограничивает возможности их широкого применения. Одним из способов снизить стоимость фотоэлектрической установки является аккумуляция электрической энергии не только в электрохимических батареях, но и в виде нагретой воды в менее дорогих водонагревательных установках, что позволит уменьшить стоимость фотоэлектрической установки за счет уменьшения ёмкости батарей при одновременном обеспечении потребителя горячей водой. Одной из актуальных задач является разработка алгоритмов управления фотоэлектростанцией с гибридной электрохимической и электротепловой системой аккумуляции фотоэлектричества.

**Цель:** разработка интеллектуального алгоритма управления энергетическим балансом автономной фотоэлектростанции с электрохимическим и электротермическим аккумулярованием фотоэлектричества.

**Методы:** аналитические методы исследования фотоэлектрических станций с агрегатным способом аккумуляции солнечной энергии: в электрохимических и электротермических батареях, методы компьютерного моделирования, метод сравнений с предыдущими научными исследованиями.

**Результаты.** Разработана структура системы управления энергетическим балансом фотоэлектростанции с электрохимическим и электротепловым аккумулярованием фотоэлектричества; предложен алгоритм функционирования системы управления с использованием МРРТ технологий; структура и алгоритм функционирования протестированы на примере оптимизации энергетического баланса социального объекта на территории Ирака путём моделирования в программном комплексе Matlab.

### Ключевые слова:

Возобновляемая энергия, солнечная радиация, фотоэлектростанция, электрохимические и электротермические накопители электроэнергии, алгоритм управления, баланс мощности, точка максимальной мощности.

### Введение

Охрана окружающей среды, в первую очередь путем борьбы с выбросами парниковых газов, стала серьезной мировой проблемой. Важное значение приобретает исследование и совершенствование альтернативных, в частности возобновляемых, источников энергии. Прогнозируется, что к 2040 г. на производство возобновляемой энергии будет приходиться 50 % от объёма производимой электроэнергии в Европейском союзе, около 30 % в Китае и Японии и более 25 % в Соединенных Штатах и Индии [1–4].

Производство электроэнергии от возобновляемых источников, в частности от солнечного излучения, весьма перспективно в районах с высокой инсоляцией, где централизованные энергетические системы недоступны, или когда доступная электроэнергия обходится дорого [5–8]. Однако высокая стоимость оборудования фотоэлектростанций (ФЭС) ограничивает возможности их широкого применения, поэтому актуальными становятся вопросы создания гибридных комплексов, а также разработка интеллектуальных

алгоритмов управления их работой, позволяющих повысить энергоэффективность работы ФЭС, а также по возможности снизить ее стоимость [9–15]. Одним из наиболее дорогостоящих компонентов ФЭС является накопитель электроэнергии на основе электрохимических батарей. Батареи, к тому же, чувствительны к температуре и имеют короткий срок службы. Актуальной задачей является разработка алгоритмов управления ФЭС с гибридной электрохимической и электротепловой системой аккумуляции фотоэлектричества.

Электрическая энергия от ФЭС может храниться не только в электрохимических батареях, но и в виде нагретой воды в менее дорогих водонагревательных установках, что позволит снизить стоимость фотоэлектрической установки за счет уменьшения ёмкости батарей при одновременном обеспечении потребителя горячей водой. Прямые солнечные водонагреватели широко доступны и отличаются простотой конструкции и низкой стоимостью, однако их эффективность сильно зависит от солнечных и погодных

условий. На эффективность фотоэлектрического преобразования существенно не влияет широкий спектр изменений энергии солнечной радиации, что позволяет фотоэлектрическим станциям расширять свои возможности, в том числе путём обеспечения потребителя не только электроэнергией, но и горячим водоснабжением с использованием электронагревателей [16–18].

#### Описание алгоритмов управления

В работе авторов [19] рассматривалась возможность использования гибридного фотоэлектрического комплекса, в состав которого включены электронагреватели, питание которых осуществляется непосредственно от массива фотоэлектрических модулей (ФМ) через электротепловой контроллер. Применение таких комплексов эффективно для потребителей с высокой долей тепловых нагрузок, так как позволяет снижать установленную мощность энергетического оборудования, предназначенного для питания только электрической нагрузки. Структура предложенного комплекса представлена на рис. 1.

В предлагаемом варианте электрическая нагрузка через инвертор получает питание от батареи электрохимических аккумуляторов (АБ). Контроллер заряда обеспечивает требуемые режимы заряда–разряда для оптимизации эксплуатационных характеристик аккумуляторов

и режимов работы фотоэлектрического комплекса. Контроллер заряда работает в режиме широтно-импульсной модуляции, что позволяет существенно увеличить способность АБ принимать заряд, а также уменьшить нагрев и газовыделение.

Подключение дизель-генераторной установки (ДГУ) осуществляет блок автоматического включения резерва (АВР), если энергии АБ недостаточно для питания электрической нагрузки.

Алгоритм работы теплового канала основан на поддержании оптимального баланса мощности в системе. Тепловой контроллер на основании данных, поступающих с датчика электропотребления и определителя максимума мощности ФЭС, формирует сигнал, поступающий на ШИМ регулятор, позволяющий подключать в систему тепловую нагрузку такой мощности, чтобы суммарная потребляемая мощность равнялась максимально возможной мощности фотоэлектрических модулей с учетом температуры и текущей инсоляции.

Работа определителя максимума мощности ФЭС может быть основана на реализации алгоритмов поиска точки максимальной мощности (МРРТ). В частности, можно использовать известный метод возмущения и наблюдения, основанный на поиске точки экстремума мощностной характеристики массива фотоэлектрических модулей [20].

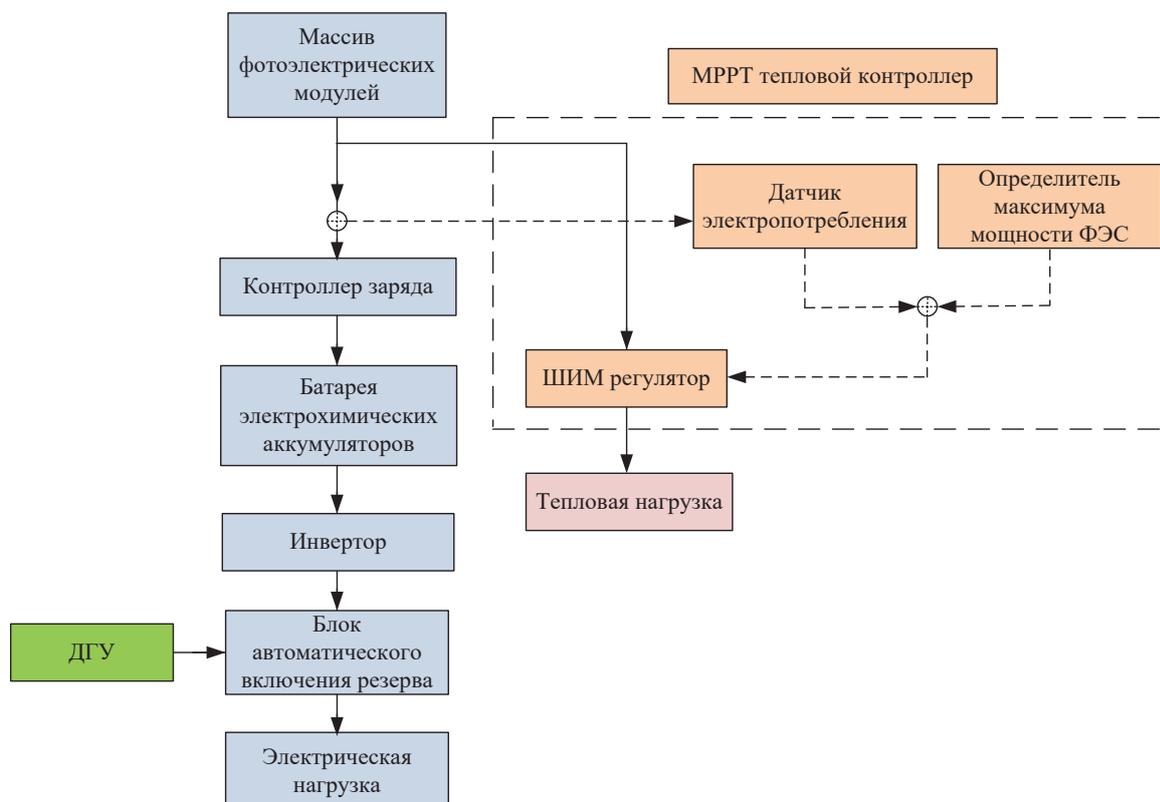


Рис. 1. Структурная схема гибридного фотоэлектрического комплекса  
 Fig. 1. Block diagram of a hybrid photovoltaic complex

Работа алгоритма «Возмущение и наблюдение» основана на периодическом сканировании выходных электрических параметров фотоэлектрического пре-

образователя  $U_{\phi}$ ,  $I_{\phi}$ , вычислении соответствующей мощности и сравнении её с мощностью на предыдущем временном интервале сканирования. Если  $\Delta P_{\phi}$

увеличивается, то необходимо увеличить напряжения задания  $U_3$  для ШИМ-регулятора мощности тепловой нагрузки (рис. 1). При уменьшении  $\Delta P_{\phi}$  необходимо уменьшить напряжение задания для регулирования мощности тепловой нагрузки. В результате в установившемся режиме алгоритм описывает колебания рабочей точки массива фотоэлектрических модулей во-

круг его точки максимальной мощности. Ток и напряжение, снимаемые с ФМ, измеряются через определенные промежутки времени, как и в распространенных солнечных MPPT контроллерах заряда аккумуляторных батарей. Логическая карта алгоритма «Возмущение и наблюдение» представлена на рис. 2.

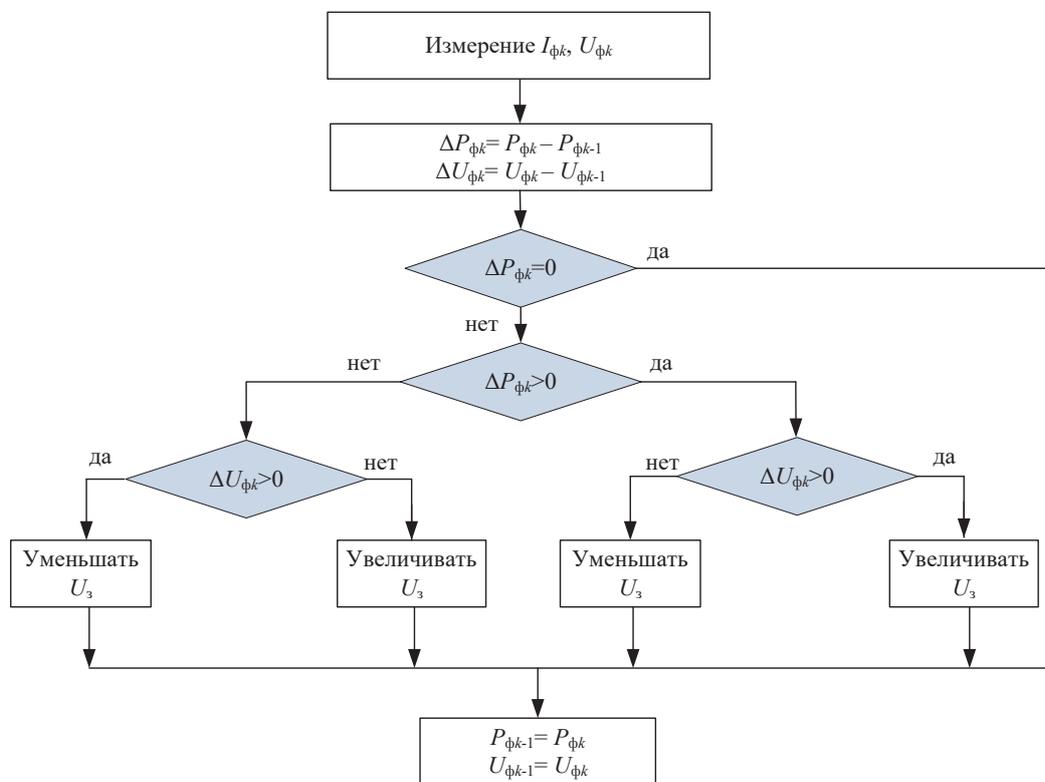


Рис. 2. Логическая карта алгоритма «Возмущение и наблюдение»  
 Fig. 2. Logical map of the «Perturbation and observation» algorithm

Логическая карта алгоритма функционирования гибридного фотоэлектрического комплекса представлена на рис. 3.

Режимы работы энергетического оборудования зависят от чередования светлого и тёмного времени суток, когда ФМ работают с избытком или недостатком полезной генерации. Подключение тепловой нагрузки определенной мощности позволяет фотоэлектрическим модулям работать в точке максимальной мощности. К примеру, если величина максимально возможной мощности ФМ  $P_{\phi \max}$  при текущей инсоляции превышает суммарную мощность, необходимую для питания электрической нагрузки  $P_{\text{эл}}$  и заряда батареи аккумуляторов  $P_{\text{зАБ}}$ , то подключается тепловая нагрузка, мощность которой определяется как

$$\Delta P = P_{\phi \max} - P_{\text{эл}} - P_{\text{зАБ}}$$

Если уровень заряда аккумуляторной батареи  $V_{\text{АБ}}$  достигает максимального значения  $V_{\text{max}}$ , то мощность тепловой нагрузки будет равна разности  $P_{\phi \max}$  и  $P_{\text{эл}}$ . Если максимально возможная мощность меньше, чем  $P_{\text{эл}}$ , и уровень заряда  $V_{\text{АБ}}$  больше минимально возможного  $V_{\text{min}}$ , то АБ отдает свою мощность электрической нагрузке. При достижении минимального

уровня заряда АБ отключается, и блок автоматического ввода резерва вводит в работу ДГУ, обеспечивая таким образом бесперебойное электроснабжение электрической нагрузки. Аккумуляторная батарея может при этом заряжаться от фотоэлектрических модулей при текущем уровне инсоляции.

В светлое время, при высоком уровне освещённости, электрическая нагрузка питается через инвертор, от батареи аккумуляторов, подключенной к ФМ, при этом ШИМ-регулятор подключает в схему тепловую нагрузку такой мощности, чтобы ФМ работали в точке максимальной возможной мощности; ДГУ при этом выключена. При недостаточном уровне освещённости на начальном этапе отключается тепловая нагрузка, недостаток мощности от ФМ электрическая нагрузка берет из АБ до момента падения энергии заряда аккумуляторов до минимально допустимого уровня. Далее отключается АБ, и в схему вводится ДГУ, работающая только на электрическую нагрузку.

В тёмное время суток ДГУ, при условии небольшой мощности электрических нагрузок, отключается, и питание осуществляется от батареи аккумуляторов.

Предложенный алгоритм проверен на примере энергообеспечения спортивного комплекса, располо-

женного в столице Ирака, Багдаде, в течение суток для зимнего и летнего периода. Город находится на высоте 40 м над уровнем моря и располагается на  $33^{\circ}20'19''$  северной широты и  $44^{\circ}23'38''$  восточной долготы. Удельная суточная инсоляция в районе Багдада

минимальна в зимний период (от 2,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>/день в декабре до 3,8 кВт·ч/м<sup>2</sup>/день в феврале) и имеет наибольшие значения в летний период (от 7,3 кВт·ч/м<sup>2</sup>/день в июне до 6,6 кВт·ч/м<sup>2</sup>/день в августе) [21].

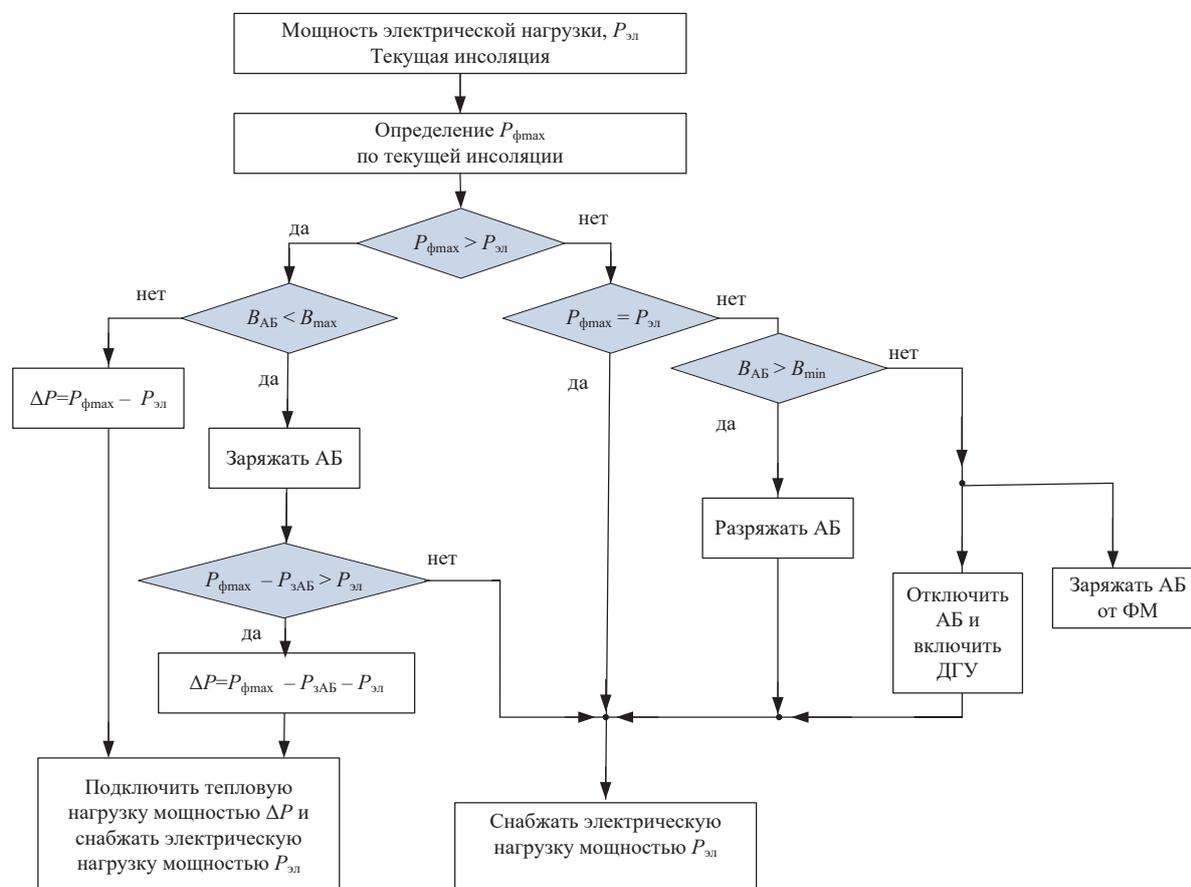


Рис. 3. Логическая карта алгоритма функционирования гибридного фотоэлектрического комплекса

Fig. 3. Logical map of the operation algorithm of the hybrid photovoltaic complex

Для обеспечения электроэнергией спортивного объекта предложено использование 300 фотоэлектрических модулей HH-MONO-200W [19], среднесуточная потенциальная генерация которых в районе Багдада рассчитана в специализированном программном

комплексе и представлена на рис. 4 [21]. Применительно к выбранным для анализа сезонам можно отметить, что количество электроэнергии, генерируемой фотоэлектрическими модулями, изменяется от 236 кВт·ч/сутки в декабре до 393 кВт·ч/сутки в июне.

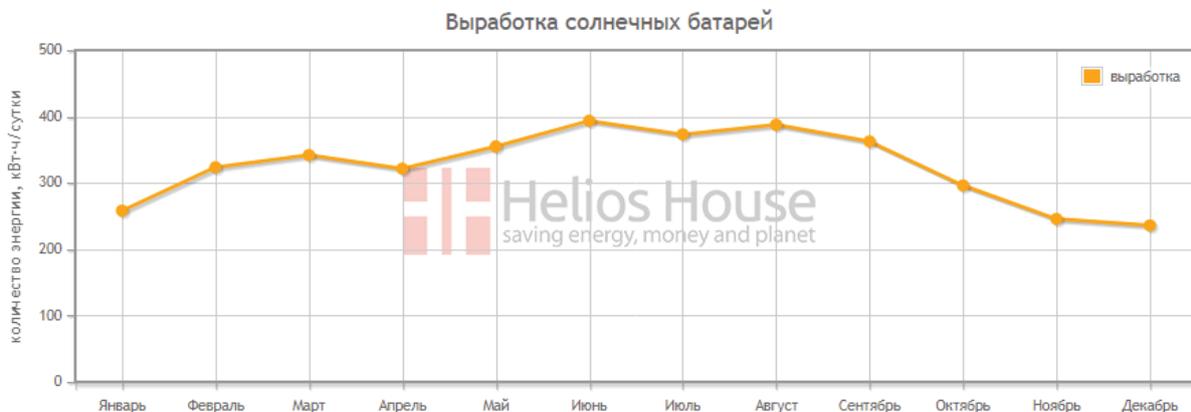


Рис. 4. График среднесуточной потенциальной генерации фотоэлектростанции

Fig. 4. Graph of the average daily potential generation of a photovoltaic power plant

Мощности и время работы электроприёмников (электрическая нагрузка) спортивного зала для летнего и зимнего сезонов приведены в таблице. Время работы зала – с 10 до 22 часов.

**Таблица.** Энергетические характеристики электроприёмников по сезонам

**Table.** Energy characteristics of electrical receivers by season

Электроприёмники Electrical receivers	Зима/Winter		Лето/Summer	
	Мощность, кВт Power, kW	Время, ч Time, hour	Мощность, кВт Power, kW	Время, ч Time, hour
Освещение зала Hall lighting	4	12	4	12
Тренажер Fitness machine	3	12	3	12
Отопление помещений Space heating	20	12	0	0
Вентиляция/Ventilation	0,6	12	0,6	12
Кондиционер Air-condition	0	0	6	12
Водоснабжение Water supply	0,5	3	0,5	6
Сауна/Sauna	2,6	5	2,6	5
Охранная сигнализация Security alarm	0,16	12	0,16	12
Стиральная машина Washing machine	0,5	4	0,5	4
Освещение автостоянки Car park lighting	1	14	1	10

Спортивный зал площадью 200 м<sup>2</sup> в среднем рассчитан на 30 посетителей в день. Время работы зала – с 10 до 22 часов. Кроме электрической энергии, душевые кабины тренажёрного зала нуждаются в горячем водоснабжении. В качестве тепловой нагрузки рассматривались ТЭНы суммарной мощностью 20 кВт.

Температура, до которой нагреется вода за определённый временной интервал от источника энергии известной мощности, рассчитывалась по формуле

$$Q_2 = \frac{\Delta Pt + cmQ_1}{cm},$$

где  $t$  – время нагрева воды [с];  $\Delta P$  – мощность, отдаваемая тепловой нагрузке [Вт];  $m$  – масса воды [кг];  $c=4183$  [Дж/кг·К] – удельная теплоёмкость воды;  $Q_2$  и  $Q_1$  – конечная и начальная температура воды [К].

При расчетах принималось, что объем воды, который необходимо нагревать, равен 660 л. Также было учтено, что при пользовании душем каждый час в бак добавляется 60 л холодной воды с температурой 3,5 °С. Пересчет температуры воды в этом случае производился по формуле

$$Q = \frac{V_{гор} \cdot Q_{гор} + V_{хол} \cdot Q_{хол}}{V_{гор} + V_{хол}},$$

где  $V_{гор}$ ,  $V_{хол}$  – объем горячей и холодной воды;  $Q_{гор}$ ,  $Q_{хол}$  – температура горячей и поступающей холодной воды.

Диаграмма энергетического баланса в условиях зимней нагрузки представлена на рис. 5. Энергия фотоэлектрических модулей варьируется в зависимости от интенсивности поступающего солнечного излучения. В ночное время (23.00 до 04.00) спортивный объект потребляет небольшую мощность, идущую на обеспечение освещения стоянки и работу охранной сигнализации. Питание в это время можно осуществлять от АБ без подключения ДГУ. Когда выработка электроэнергии от ФМ начинает увеличиваться, АБ начинает заряжаться, что видно с 05:00 до 06:00 часов (на рис. 5 потенциально возможная мощность, идущая на заряд и разряд АБ, выделена зеленым цветом). В период времени с 06:00 до 13:00 ФМ работают в точке максимальной мощности, и избыточная энергия идёт на подогрев воды в душевых. В часы нехватки запасенной энергии и энергии ФМ с 15.00 до 22.00 АВР вводит в работу ДГУ. Электрическая нагрузка питается только от генератора, при этом АБ может подзаряжаться от ФМ.



**Рис. 5.** Диаграмма энергетического баланса в условиях зимней нагрузки

**Fig. 5.** Energy balance diagram under winter load conditions

На диаграмме, представленной на рис. 6, показано изменение температуры воды при работе нагревателей и ее остывания из-за смешивания с холодной водой днем и естественного остывания ночью, когда ДГУ отключена. Как видно из диаграммы, в часы работы спортзала температура воды изменяется от 100 градусов в утренний период активного солнца до 40 градусов ко времени его закрытия, при этом подогрев воды осуществляется только за счет использования энергии фотоэлектрических модулей, работающих в точке максимальной мощности.

Для анализа режима работы ФЭС в летние сутки необходимо изменить входные данные. Энергия ФМ

также варьируется в зависимости от количества поступающего солнечного излучения.

Алгоритм работы остается тем же, но время работы ДЭС существенно сокращается из-за повышенного уровня инсоляции и сокращения мощности электрической нагрузки. Диаграммы энергетического баланса и почасового изменения температуры представлены на рис. 7, 8 соответственно. Стоит отметить, что в течение летних суток энергия ФМ позволяет поддерживать температуру воды от 30 до 100 градусов, а в течение дня температура держится на уровне 100 градусов, что свидетельствует об энергоэффективности предложенного алгоритма.

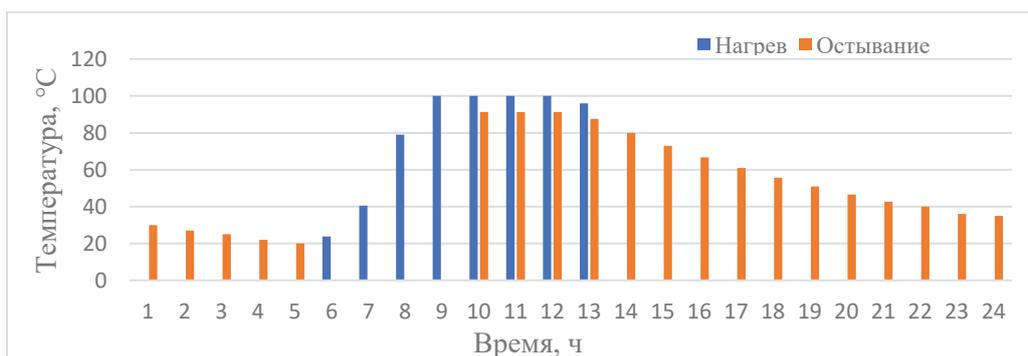


Рис. 6. Почасовое изменение температуры воды (зима)

Fig. 6. Hourly change in water temperature (winter)

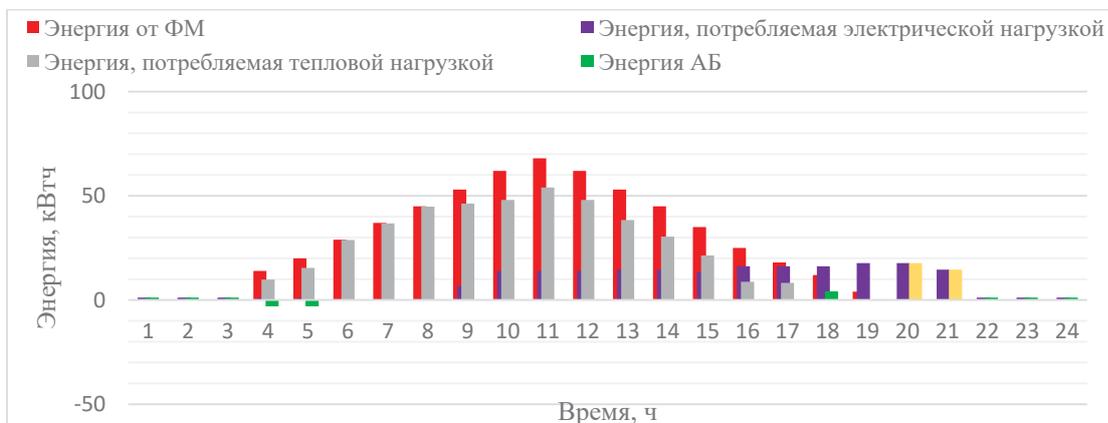


Рис. 7. Диаграмма энергетического баланса в условиях летней нагрузки

Fig. 7. Energy balance diagram under summer load conditions

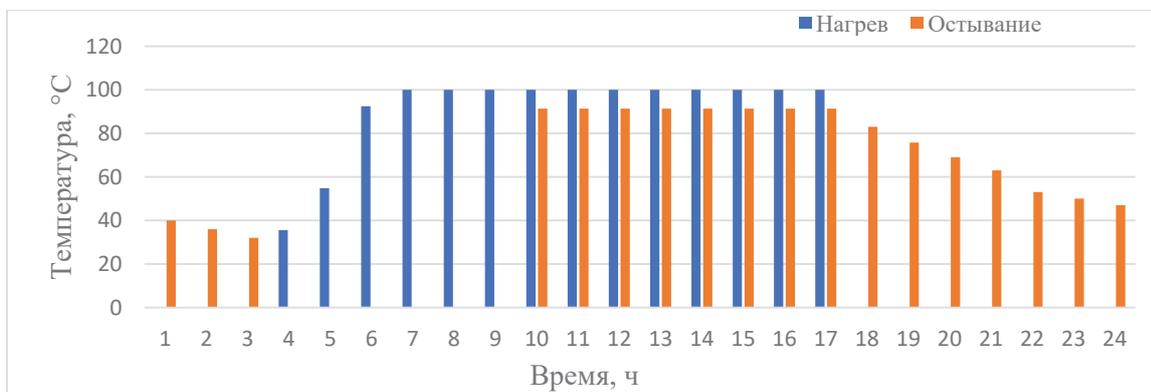


Рис. 8. Почасовое изменение температуры воды (лето)

Fig. 8. Hourly change in water temperature (summer)

## Заключение

Анализ энергетических балансов автономной ФЭС с комбинированным электрохимическим и электротепловым аккумулярованием генерируемой электроэнергии позволил установить целесообразность реализации режима работы массива фотоэлектрических модулей в точке максимальной мощности путём управления доступной мощностью электронагревателей системы горячего водоснабжения. Заряд электрохимических аккумуляторов, питающих электрические нагрузки автономного энергетического комплекса, осуществляется контроллером заряда, обеспечивающим оптимальные режимы заряда-разряда батареи аккумуляторов.

Основные результаты исследования:

1. Предложена структура построения и алгоритм работы электротеплового МРРТ контроллера, формирующего управляющее воздействие для регуля-

тора мощности тепловых нагрузок в виде напряжения задания с использованием известного метода поиска точки максимальной мощности фотоэлектрического преобразователя – метод «Возмущения и наблюдения».

2. Разработана структура и алгоритм функционирования системы управления энергетическим балансом автономной фотоэлектрической системы с электрохимическими и электротепловыми накопителями фотоэлектричества, обеспечивающая минимизацию электропотребления электроэнергии от дополнительного источника электропитания – дизельного генератора.
3. Материалы статьи могут быть полезны разработчикам автономных систем электроснабжения с использованием фотоэлектростанций для потребителей с существенной долей электротепловых нагрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Statistical review of world energy. 2022. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy.html> (дата обращения 20.06.2022).
2. Sawe Y., Gopta S.C., Bohra A.V. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid system // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 81 (2). – P. 2217–2235.
3. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables> (дата обращения 20.06.2022).
4. International Energy Agency (IEA) // *Renewables*, 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/electricity> (дата обращения 20.06.2022).
5. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Максимов Н.А. Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро-солнечной электростанции // *Промышленная энергетика*. – 2019. – № 10. – С. 47–53.
6. Пашкевич Р.И., Павлов К.А. Математическое моделирование комбинированной дизель-солнечной электростанции для децентрализованного электроснабжения потребителей // *Электрические станции. Возобновляемая энергетика*. – 2019. – № 9 (1058). – С. 30–35.
7. Al-Nama M.A., Al-Hafid M.S., Al-Fahadi A.S. Estimation of the diversity factor for the Iraqi distribution system using intelligent methods // *Al-Rafidain Engineering*. – 2009. – V. 17 (1). – P. 14–21.
8. Lukutin B.V., Kiushkina V.R. Intellectual energy security monitoring of decentralized systems of electricity with renewable energy sources // *International Conference Green Energy and Smart Grids (GESG 2018)*. – Irkutsk, Cape Hadartha: EDP Sciences, 2018. – P. 02002.
9. Anwari M., Bouchekara H.R.E.H., Alghamdi A.S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm // *Renewable Energy*. – 2018. – V. 121. – P. 400–411.
10. Optimization and energy management of hybrid photovoltaic-diesel-battery system to pump and desalinate water at isolated regions / H. Rezk, M. Al-Dhaifallah, Y.B. Hassan et al. // *IEEE Access*. – 2020. – V. 8. – P. 102512–102529.
11. Обухов С.Г., Плотников И.А. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за солнцем // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 95–106.
12. Non-radiation degradation of solar array energy performances for MEO satellites / V.G. Bukreev, M.V. Nesterishin, P.A. Kryuchkov et al. // *Russian Aeronautics*. – 2021. – V. 64. – № 1. – P. 122–131.
13. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии / С.Г. Обухов, И.А. Плотников, А. Ибрагим, В.Г. Масолов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 64–76.
14. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 184–196.
15. An energy flow simulation tool for incorporating short-term PV forecasting in a diesel-PV-battery off-grid power supply system / J. Taskin, C. Carter, T. Schmidt et al. // *Applied Energy*. – 2019. – V. 254. – P. 113718.
16. Shneishil A.H. Design and fabrication of evacuated tube solar thermal collector for domestic hot water // *Journal of college education*. – 2016. – № 3. – P. 287–302.
17. Lukutin B.V., Orazbekova A.K. Technical and economic feasibility of thermal accumulation of energy at autonomous photovoltaic power stations // *International Eurasian Conference on future energy and IEEE international Siberian Conference on control and communications (SIBCON-2017)*. – Astana, 2017. – № 7998489.
18. Jaaz A.H., Sopian K., Gaaz T.S. Study of the electrical and thermal performances of photovoltaic thermal Collector-Compound parabolic concentrated // *Results in Physics*. – 2018. – V. 9. – P. 500–510.
19. Лукутин Б.В., Хамид К. Фотоэлектростанции с электрохимическим и тепловым накоплением энергии в Ираке // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 174–183.
20. Мухамбедьяров Б.Б., Лукичев Д.В., Полуго Н.Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2018. – Т. 18. – № 6. – С. 1099–1107.
21. Global solar atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study> (дата обращения 25.06.2022).

Поступила 27.06.2022 г.

Прошла рецензирование 22.09.2022 г.

## Информация об авторах

**Лукутин Б.В.**, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Шандарова Е.Б.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Аль-Мажди Каррар Хамид**, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.002

## ENERGY EFFICIENT ALGORITHM FOR CONTROLLING PHOTOVOLTAIC POWER PLANT WITH ELECTROCHEMICAL AND THERMAL ENERGY STORAGE

**Boris V. Lukutin<sup>1</sup>,**  
lukutin48@mail.ru

**Elena B. Shandarova<sup>1</sup>,**  
shandarovaelena@mail.ru

**Karrar Hameed Kadhim<sup>1</sup>,**  
karrar.almussawi.87@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the work is determined by the growing demand for energy, especially for environmentally friendly. Photovoltaic power generation is very promising in areas with high insolation, where centralized power systems are not available or where available electricity is expensive. However, the high cost of photovoltaic power plant equipment limits its wide application. One way to reduce the cost of a photovoltaic installation is to store electrical energy not only in electrochemical batteries, but also in the form of heated water in less expensive water heating installations, which will reduce the cost of a photovoltaic installation by reducing the battery capacity while providing the consumer with hot water. One of the urgent tasks is the development of control algorithms for photovoltaic power plants with a hybrid electrochemical and thermal system for storing electricity.

**The main aim** of the work is to develop the algorithm for controlling the energy balance of an autonomous photovoltaic power plant with electrochemical and thermal energy storage.

**Methods:** analytical methods for studying photovoltaic power plants with an aggregate method of solar energy storage: in electrochemical and thermal batteries, computer simulation methods, method of comparison with previous scientific studies.

**Results.** The authors developed the structure of the control system for energy balance of a photovoltaic power plant with electrochemical and thermal storage of electricity and proposed the algorithm for functioning of the control system using MPPT technologies. The structure and functioning algorithm were tested on the example of optimizing the energy balance of a social facility in Iraq by modeling in the Matlab software package.

### Key words:

Renewable energy, solar radiation, photovoltaic power plant, electrochemical and thermal energy storage devices, control algorithm, power balance, maximum power point.

### REFERENCES

1. *Statistical review of world energy*. 2022. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy.html> (accessed 20 June 2022).
2. Sawe Y., Gupta S.C., Bohra A.V. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81 (2), pp. 2217–2235.
3. International Energy Agency. *Renewables*. Available at: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables> (accessed 20 June 2022).
4. International Energy Agency (IEA). *Electricity: global electricity demand is expected to fall by 5 % in 2020*. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/electricity> (accessed 20 June 2022).
5. Lavrik A.Yu., Zhukovskiy Yu.L., Maksimov N.A. Opredelenie optimalnogo sostava rezerviruemyy gibridnoy vetro-solnechnoy elektrostantsii [Determination of the optimal composition of a standby hybrid wind-solar power plant]. *Promyshlennaya energetika*, 2019, no. 10, pp. 47–53.
6. Pashkevich R.I., Pavlov K.A. Mathematical modeling of a combined diesel-solar power station for decentralized power supply to consumers. *Power Technology and Engineering*, 2019, no. 9 (1058), pp. 30–35. In Rus.
7. Al-Nama M.A., Al-Hafid M.S., Al-Fahadi A.S. Estimation of the diversity factor for the Iraqi distribution system using intelligent methods. *Al-Rafidain Engineering*, 2009, vol. 17 (1), pp. 14–21.
8. Lukutin B.V., Kiushkina V.R. Intellectual energy security monitoring of decentralized systems of electricity with renewable energy sources. *International Conference Green Energy and Smart Grids (GESG 2018)*. Irkutsk, Cape Hadartha, EDP Sciences, 2018. pp. 02002.
9. Anwari M., Bouchekara H.R.E.H., Alghamdi A.S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm. *Renewable Energy*, 2018, vol. 121, pp. 400–411.
10. Rezk H., Al-Dhaifallah M., Hassan Y.B. Optimization and energy management of hybrid photovoltaic-diesel-battery system to pump and desalinate water at isolated regions. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 102512–102529.
11. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Choosing the parameters and analyzing the efficiency of solar tracking systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 95–106. In Rus.
12. Bukreev V.G., Nesterishin M.V., Kryuchkov P.A., Zhuravlev A.V., Balashov S.V. Non-Radiation Degradation of Solar Array Energy Performances for MEO Satellites. *Russian Aeronautics*, 2021, vol. 64 (1), pp. 122–131. In Rus.
13. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Ibrahim Ahmed, Masolov V.G. Dual energy storage for hybrid energy systems with renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 64–76. In Rus.
14. Lukutin B.V., Muravyov D.I. Prospects for decentralized DC power supply systems with distributed solar generation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 184–196. In Rus.
15. Taskin J., Carter C., Schmidt T.. An energy flow simulation tool for incorporating short-term PV forecasting in a diesel-PV-battery off-grid power supply system. *Applied Energy*, 2019, vol. 254, pp. 113718.

16. Shneishil A.H. Design and fabrication of evacuated tube solar thermal collector for domestic hot water. *Journal of college education*, 2016, no. 3, pp. 287–302.
17. Lukutin B.V., Orazbekova A.K. Technical and economic feasibility of thermal accumulation of energy at autonomous photovoltaic power stations. *International Eurasian Conference on future energy and IEEE international Siberian Conference on control and communications (SIBCON-2017)*. Astana, Kazakhstan, 2017. pp. 7998489.
18. Jaaz A.H., Sopian K., Gaaz T.S. Study of the electrical and thermal performances of photovoltaic thermal Collector-Compound parabolic concentrated. *Results in Physics*, 2018, vol. 9, pp. 500–510.
19. Lukutin B.V., Hameed K. Photovoltaic power plants with electrochemical and thermal energy storage in Iraq. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 174–183. In Rus.
20. Mukhambedyarov B.B., Lukichev D.V., Polyuga N.L. Study of maximum power point tracking algorithms for efficiency growth of photovoltaic cells. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1099–1107.
21. *Global solar atlas*. Available at: <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>. (accessed 25 June 2022).

Received: 27 June 2022.

Received: 22 September 2022.

#### Information about the authors

**Boris V. Lukutin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Elena B. Shandarova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Karrar Hameed Kadhim**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.