



## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ И ТЕПЛОВЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Б.В. Лукутин, Аль-Мажди Каррар Хамид

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск

lukutin48@mail.ru

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Изучение возможности строительства гибридных электростанций для снижения дефицита и стоимости энергии в условиях Ирака за счет совместного использования солнечных электрохимических и электротепловых аккумуляторов фотоэлектростанций. *МЕТОДЫ.* Аналитические методы в области построения систем энергоснабжения потребителей от фотоэлектрических станций, методы компьютерного математического моделирования. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведен анализ суточных алгоритмов функционирования солнечной теплоэлектрической системы энергообеспечения на примере социального объекта в Ираке с использованием электрохимических и электротепловых систем аккумулирования электроэнергии с учетом варьирования уровня солнечной радиации, температуры окружающей среды и энергопотребления по сезонам года. Предложен оптимальный, для рассматриваемых условий, алгоритм функционирования системы солнечного энергоснабжения и её элементов. Обозначены пути построения интеллектуального термоэлектрического контроллера, обеспечивающего преобразование максимальной доступной мощности фотоэлектростанции в тепловую энергию.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что предложенная структура построения фотоэлектростанций с комбинированным аккумулированием электроэнергии предпочтительнее для потребителей со значительным объемом тепловых нагрузок поскольку эффективность непосредственного преобразования электроэнергии от фотоэлектрических модулей в тепловую энергию выше, чем эффективность ее теплового преобразования через промежуточное звено - электрохимическую батарею. В работе предложен принцип создания интеллектуальных электротепловых контроллеров, обеспечивающий работу фотоэлектростанции в режиме максимальной мощности.

**Ключевые слова:** фотоэнергетика; гибридная электрохимическая и электротепловая системы аккумулирования; компьютерное моделирование; электротепловой контроллер.

**Для цитирования:** Лукутин Б.В., Аль-Мажди Каррар Хамид. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулированием солнечной энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24, № 2. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.

## OPTIMIZATION OF ENERGY BALANCES OF A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT WITH ELECTROCHEMICAL AND THERMAL STORAGE OF SOLAR ENERGY

B.V. Lukutin<sup>1</sup>, Karrar Hameed Kadhimi<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic Russia. Tomsk

lukutin48@mail.ru

**Abstract:** *THE PURPOSE.* Exploring the possibility of building hybrid power plants to reduce the shortage and cost of energy in Iraq through the combined use of solar electrochemical and thermal batteries. *METHODS.* Analytical methods in the field of construction of consumer energy supply systems from photovoltaic plants, methods of computer-mathematical modeling. *RESULTS.*

*The analysis of daily algorithms for the operation of a solar thermal energy supply system was carried out using the example of a social facility in Iraq using electrochemical and thermoelectric energy storage systems, taking into account the variation in the level of solar radiation, ambient temperature and energy consumption by seasons. An optimal algorithm for the conditions under study is proposed for the operation of the solar energy supply system and its elements. Methods for building an intelligent thermoelectric controller have been defined, which ensure the conversion of the maximum available energy of the PV power plant into thermal energy. CONCLUSION. It turns out that the proposed structure for the construction of photovoltaic power plants with combined storage of electricity is preferable to consumers with large thermal loads, because of the efficiency of direct conversion of electricity from photovoltaic modules to thermal energy is higher than the efficiency of thermal conversion through an intermediate link - an electrochemical battery. The paper proposes the principle of creating intelligent thermoelectric controllers, which ensure the operation of a photovoltaic power plant in maximum power mode.*

**Key words:** photovoltaic; hybrid electrochemical and electrothermal storage systems; computer modeling; electrothermal controller.

**For citation:** Lukutin BV., Karrar Hameed Kadhim. Optimization of energy balances of a photovoltaic power plant with electrochemical and thermal storage of solar energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(2):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.

### **Введение**

Мировой спрос на энергию, особенно на возобновляемые источники энергии, быстро растет. Охрана окружающей среды путем борьбы с загрязнением, особенно выбросами парниковых газов, стала серьезной проблемой во всем мире. Энергия ископаемого топлива сегодня еще доступна, но время обильной недорогой энергии подходит к концу. В настоящее время большое значение приобретает исследование альтернативных источников энергии, в частности возобновляемых, а также решение экологических проблем, связанных с этими источниками. Прогнозируется, что к 2040 году на производство возобновляемой энергии будет приходиться 50% производства электроэнергии в Европейском союзе, около 30% в Китае и Японии и более 25% в Соединенных Штатах и Индии; на уголь будет приходиться менее 15% производства электроэнергии за пределами Азии [1]. Из-за растущего расхождения в электрических нагрузках между пиковыми и непиковыми часами управление спросом на энергию становится все более сложным. Временной дисбаланс между пиковым спросом и производством возобновляемой энергии становится все более важным по мере увеличения вклада возобновляемых источников энергии в общий энергобаланс. Калифорнийский независимый системный оператор (*California Independent System Operator*) опубликовал график в 2012 году, на котором изображено производство и потребление электроэнергии в течение дня. Из-за огромного роста фотовольтаики в Калифорнии график, известный как кривая утки, изображает растущее несоответствие между утренним и вечерним спросом на энергию по сравнению с полуденным [2]. Рост «зеленой» энергетики обеспечил стабилизацию негативного воздействия выбросов углерода, а также темпов сокращения ресурсов ископаемого топлива. Возобновляемые источники энергии препятствуют изменению климата, обеспечивают надежное энергоснабжение, новые возможности трудоустройства, гигиену окружающей среды и доступ к энергии в отдаленных районах. Солнечная энергия является одним из перспективных возобновляемых энергоресурсов и имеет потенциал для удовлетворения значительного объема мирового спроса на энергию. Эволюция возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, способна обеспечить человечество неисчерпаемой чистой энергией [3-8].

Возобновляемые источники энергии, особенно солнечная энергия, могут быть использованы в системах электроснабжения, в первую очередь в районах, где централизованные энергетические системы недоступны или когда доступная электроэнергия является дорогостоящей. Высокая стоимость фотоэлектрического силового оборудования электростанции остается барьером для их более широкого использования. Это относится к электрохимическим аккумуляторам, которые обычно используются для координации энергетического баланса солнечной системы. Аккумуляторы, также, чувствительны к температуре, имеют короткий срок службы и стоят дорого. Электрическая

энергия от фотоэлектрических станций может аккумулироваться не только электрохимическим способом, но и в менее дорогих электротермических потребителях – аккумуляторах - водонагревательных установках. Это позволяет снизить стоимость фотоэлектрической установки за счет уменьшения емкости дорогостоящих аккумуляторов, при одновременном обеспечении потребителя горячей водой [9].

В зависимости от конструкции и технических качеств стоимость единицы площади коллектора разных конструкций варьируется. Солнечные коллекторы с простейшими конструкциями стоят 2,3 тысячи рублей за квадратный метр [10]. Недостатком солнечных водонагревателей является то, что их эффективность сильно зависит от солнечных и погодных условий. На эффективность фотоэлектрического преобразования существенно не влияет достаточно широкий диапазон изменений энергии солнечной радиации, что позволяет фотоэлектрическим станциям расширять свои возможности, в том числе и обеспечения горячего водоснабжения [11].

В иракской системе распределения электроэнергии был исследован коэффициент разнообразия электрических нагрузок. Согласно исследованию, бытовая и промышленная нагрузка увеличивается быстрее по сравнению со средним увеличением. Бытовые нагрузки являются наиболее значимыми компонентами иракских электрических сетей. Электрические приемники в доме включают бытовую технику, освещение, отопление помещений, охлаждение и нагрев воды. Опрос показал, что нагрев воды потребляет больше всего электроэнергии, составляя 32,29 процента [12]. Избегая более высоких тарифов в часы пик, тепловое аккумулирование экономит счета за электроэнергию. Пользователи, которые могут адаптироваться к изменяющемуся предложению и спросу на энергию, получают выгоду от аккумулирования энергии [13].

Фотоэлектрическая (PV) технология преобразует солнечную энергию в электричество для использования в различных целях, таких как подогрев воды и отопление помещений, использование электроэнергии для бытовых приборов и приготовления пищи. Эффективность преобразования фотоэлементов из солнечной энергии в электричество снижается по мере повышения рабочих температур. Объединение солнечных тепловых коллекторов и фотоэлементов в системе, известной как тепловая фотоэлектрическая (PVT), может снизить рабочую температуру и повысить эффективность системы. Гибридные системы PVT, объединяющие фотоэлектрические и солнечные тепловые технологии, очень перспективны для одновременного производства электрической и тепловой энергии [14-17].

Очень актуальной проблемой для иракской энергетики является снижение нагрузки на энергетическую систему, в том числе за счет ввода в эксплуатацию мощностей по производству возобновляемой энергии, в первую очередь солнечной [18]. Учитывая дефицит иракской энергосистемы, которая восполняется за счет импорта около 22% электроэнергии из Ирана (на фоне санкций США в отношении участников сотрудничества с Ираном), снижение нагрузки на энергосистему является весьма актуальной проблемой для энергетики Ирака.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии MRPT-технологий солнечных контроллеров для применения не только для зарядки электрохимических аккумуляторов, но и для электротепловых утилизаторов электроэнергии фотоэлектрических станций. Предложен алгоритм функционирования гибридной электрохимической и электротепловой системы аккумулирования.

Практическая значимость исследования заключается в обосновании применения и разработке рекомендаций по построению фотоэлектрических станций с гибридной системой аккумулирования электроэнергии для обеспечения социально-бытовых объектов электроэнергией и горячей водой в условиях Ирака.

#### **Материалы и методы**

Почасовая генерация массива фотоэлектрических элементов в районе установки фотоэлектростанции в течение года и его основные характеристики показаны на рисунке 1 и в таблице 1. Онлайн-приложение Глобального солнечного атласа (<https://globalsolaratlas.info/>), на основе базы данных о солнечных ресурсах, позволяет определить параметры фотоэлектрической генерации для конкретного объекта.

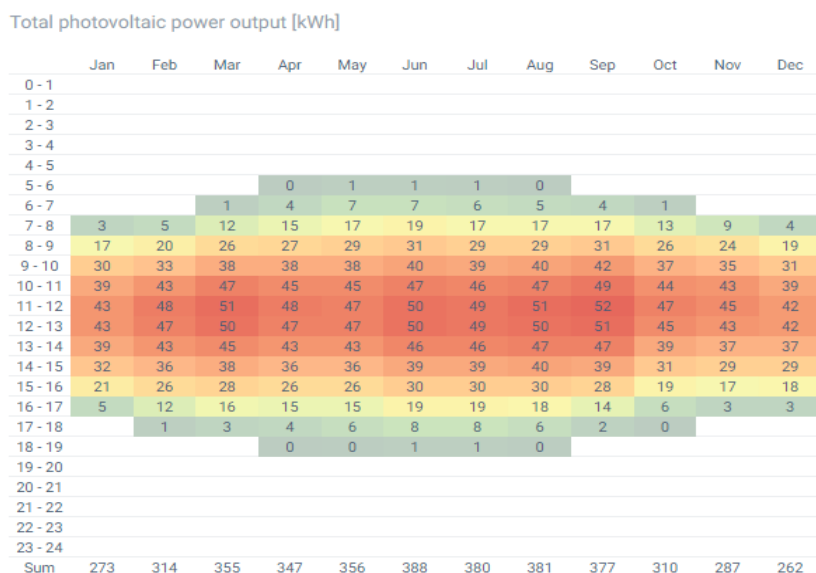


Рис.1. Часовые изменения фотоэлектрической генерации для характерных суток каждого месяца в течение года

Fig.1. Hourly changes in photovoltaic generation for a typical day during the year

Таблица 1

Параметры массива фотоэлектрических модулей.

| Pv system            | Small residential |
|----------------------|-------------------|
| Azimuth of PV panels | 180°              |
| Tilt of PV panels    | 30°               |
| Installed capacity   | 76 kWp            |

#### Объект и методы исследования

Обширная территория и низкая плотность населения Ирака с высоким потенциалом солнечной энергетики определяют перспективы использования фотоэлектрических станций. Территория Ирака находится под влиянием солнечной энергии, получая около 2000 кВт\*ч/м<sup>2</sup>/год, что определяет актуальность использования технологий солнечной энергетики для поддержки экономики страны за счет снижения потребления электроэнергии в иракской национальной электросети. Ирак считается второй страной в мире по энергоемкости солнца. На основе построенной карты распределения инсоляции по территории Ирака потенциальные площади для создания крупных крупномасштабных солнечных электростанций показывают, что Ирак входит в число стран, наиболее пригодных для использования солнечной энергии [19]. Выбор оборудования для децентрализованных фотоэлектрических установок определяется графиками инсоляции и потребления электроэнергии. Схема предлагаемой независимой гибридной фотоэлектрической установки с резервированием от дополнительного источника энергии - дизель-генератора - или централизованной сети показана на рисунке 2. Схема отличается от обычной фотоэлектрической установки с электрохимическим накопителем электроэнергии и резервным дизель-генератором наличием тепловых нагрузок, которые питаются непосредственно от массива фотоэлектрических модулей через специальный электротермический контроллер.

Принятые на рисунке 2 обозначения: PV/T - массив фотоэлектрических модулей; TL - электротермический аккумулятор; TC - электротермический контроллер; В - батарея электрохимических аккумуляторов; CC - контроллер заряда аккумулятора; I - инвертор; DG - дизель-генератор или другой источник энергии; AU - автоматический переключатель энергоисточников; EL - электрическая нагрузка. Исследуемый район - Ирак, Мухафаза Аль-Анбар, расположен на высоте 45 м над уровнем моря. Город расположен на 32.5598° северной широты, 41.9196° восточной долготы.

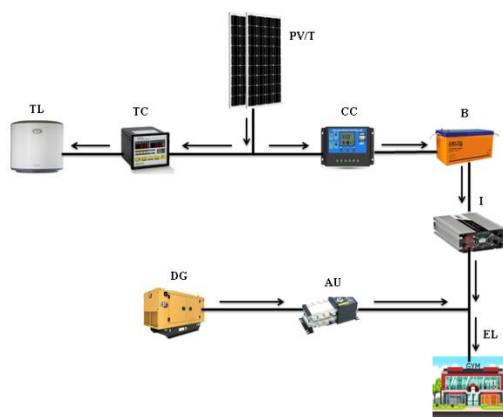


Рис. 2. Блок-схема фотоэлектрической системы с электрохимическими и электротермическими аккумуляторами

Fig. 2. Block diagram of a photovoltaic system with electrochemical and electrothermal batteries

Распределенная генерация с аккумулированием энергии и интеллектуальным управлением генерацией и потреблением электроэнергии составляет большинство решений для возобновляемой энергетики. Различные исследования показывают, что для устойчивой и надежной работы таких энергосистем требуется разработка соответствующих методов и алгоритмов управления энергией, включая её аккумулирование и потребление. Необходимо, также, тщательный анализ экономической целесообразности интеграции солнечной электростанции с сетью.

В качестве примера объекта электроснабжения был выбран социальный объект – тренажерный зал. Площадь зала составляет 200 м<sup>2</sup> и рассчитана на прием 30 посетителей в день, с рабочим периодом 12 часов в день. Социальный объект нуждается в электрической энергии и горячей воде.

Общий суточный расход энергии на тренажерный зал будет определяться следующим образом:

$$W_{но} = W_{э} + W_{н} \dots\dots\dots (1)$$

где  $W_{но}$  – общее энергопотребление,  $W_{э}$  - электроэнергия, потребляемая электрическими нагрузками;  $W_{н}$  - электричество, потребляемое при нагревании воды.

В зависимости от сезона, суммарная мощность  $W_{но}$ , мощность электрических нагрузок  $W_{э}$  и мощность электрического нагревателя  $W_{н}$  за день приведены в таблице 2 [20].

Таблица. 2

Энергетический баланс тепловых и электрических нагрузок.

| Сезон | Баланс энергии в течение характерного дня сезона, кВтч |         |         |
|-------|--------------------------------------------------------|---------|---------|
|       | $W_{но}$                                               | $W_{э}$ | $W_{н}$ |
| Зима  | 530                                                    | 360     | 170     |
| Весна | 302                                                    | 158     | 144     |
| Лето  | 340                                                    | 196     | 144     |
| Осень | 451                                                    | 281     | 170     |

Эти объемы электроэнергии должны ежедневно вырабатываться фотоэлектрической установкой или любым другим источником энергии, а для фотоэлектрической станции необходимое количество этой энергии должно быть предоставлено спортивному объекту с использованием систем аккумулирования из-за различных периодов времени солнечной радиации и электропотребления. По данным рисунка1 и таблицы 2 можно построить энергетический баланс системы электроснабжения с учётом применяемых систем аккумулирования электроэнергии, приведённый в таблице 3.

Таблица 3

Суточные энергетические балансы фотоэлектрической системы энергоснабжения

| Время суток, часы | Суточные зависимости почасовой энергии фотоэлектрической генерации WPV, потребления электрической нагрузкой WE и электрической тепловой нагрузкой WH по сезонам года, кВтч |       |    |       |      |    |      |      |     |       |       |    |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----|-------|------|----|------|------|-----|-------|-------|----|
|                   | Зима                                                                                                                                                                       |       |    | Весна |      |    | Лето |      |     | Осень |       |    |
|                   | WPV                                                                                                                                                                        | WE    | WH | WPV   | WE   | WH | WPV  | WE   | WH  | WPV   | WE    | WH |
| 0-1               | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 0    | 0    | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 1-2               | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 0    | 0    | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 2-3               | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 0    | 0    | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 3-4               | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 0    | 0    | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 4-5               | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 0    | 0    | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 5-6               | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 1    | 0    | 1   | 0     | 0     | 0  |
| 6-7               | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 1     | 0    | 1  | 7    | 0    | 7   | 1     | 0     | 1  |
| 7-8               | 3                                                                                                                                                                          | 0     | 3  | 12    | 0    | 12 | 19   | 0    | 19  | 13    | 0     | 13 |
| 8-9               | 17                                                                                                                                                                         | 0     | 17 | 26    | 0    | 26 | 31   | 0    | 31  | 26    | 0     | 26 |
| 9-10              | 30                                                                                                                                                                         | 0     | 30 | 38    | 0    | 38 | 40   | 0    | 40  | 37    | 0     | 37 |
| 10-11             | 39                                                                                                                                                                         | 30    | 9  | 47    | 13   | 34 | 47   | 16   | 31  | 44    | 23    | 21 |
| 11-12             | 43                                                                                                                                                                         | 30    | 13 | 51    | 13   | 38 | 50   | 16   | 34  | 47    | 23    | 24 |
| 12-13             | 43                                                                                                                                                                         | 30    | 13 | 50    | 13   | 37 | 50   | 16   | 34  | 45    | 23    | 22 |
| 13-14             | 39                                                                                                                                                                         | 30    | 9  | 45    | 13   | 32 | 46   | 16   | 30  | 39    | 23    | 16 |
| 14-15             | 32                                                                                                                                                                         | 30    | 2  | 38    | 13   | 25 | 39   | 16   | 23  | 31    | 23    | 8  |
| 15-16             | 21                                                                                                                                                                         | 21-30 | 0  | 28    | 13   | 15 | 30   | 16   | 15  | 19    | 19-23 | 0  |
| 16-17             | 5                                                                                                                                                                          | 5-30  | 0  | 16    | 13   | 3  | 19   | 16   | 3.0 | 6     | 6-23  | 0  |
| 17-18             | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 3     | 3-13 | 0  | 8    | 8-16 | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 18-19             | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 13   | 0  | 1    | 1-16 | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 19-20             | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 13   | 0  | 0    | 16   | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 20-21             | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 13   | 0  | 0    | 16   | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 21-22             | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 13   | 0  | 0    | 16   | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 22-23             | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 0    | 0    | 0   | 0     | 0     | 0  |
| 23-24             | 0                                                                                                                                                                          | 0     | 0  | 0     | 0    | 0  | 0    | 0    | 0   | 0     | 0     | 0  |

Специфика электрических нагрузок спортивного зала позволяет принять электрическую нагрузку (освещение, электроотопление и кондиционирование, тренажёры и пр.) постоянной в течение рабочего дня. В таблице 3 эта нагрузка, для рассматриваемого объекта, равна: зимняя -30 кВт, весенняя -13 кВт, летняя – 16 кВт, осенняя – 23 кВт. При отсутствии инсоляции электрические нагрузки весной и летом питаются от аккумуляторов, осенью и зимой – от дополнительного источника, восполняющего недостаток фотогенерации для увеличенного зимнего спроса на электроэнергию. Величина этой энергии, например для лета, составляет за время с 17 до 22 часов 70 - 80 кВтч. Эта обменная энергия должна предварительно восполняться в аккумуляторах в течение светового дня, продолжающегося 13 – 14 часов. Из этого времени разумно вычесть утренние часы до начала рабочего дня, чтобы направить электроэнергию фотоэлектростанции на подогрев воды к началу рабочего дня – 10 часов. Дополнительный энергоисточник осенью и зимой необходимо включать на 5 – 6 часов.

Затраты энергии на нагрев воды можно рассчитать по формуле:

$$Pt = M \cdot C_w \cdot (H_2 - H_1), \quad (2)$$

где  $t$  - время нагрева воды [сек.], период дискретизации процессов равен 1 часу или 3600 сек.;  $P$  - мощность нагревательного элемента [кВт];  $M$  - масса воды [кг];  $C_w = 4,2$  кДж/кг град - удельная теплоемкость воды;  $H_2$  и  $H_1$  – конечная и начальная температуры воды [20]. Расчёты показывают, что 600 литров воды и рассматриваемых условиях.

Временные диаграммы почасового изменения энергетического баланса системы энергообеспечения объекта в условиях рассматриваемого примера приведены на рисунке 3.

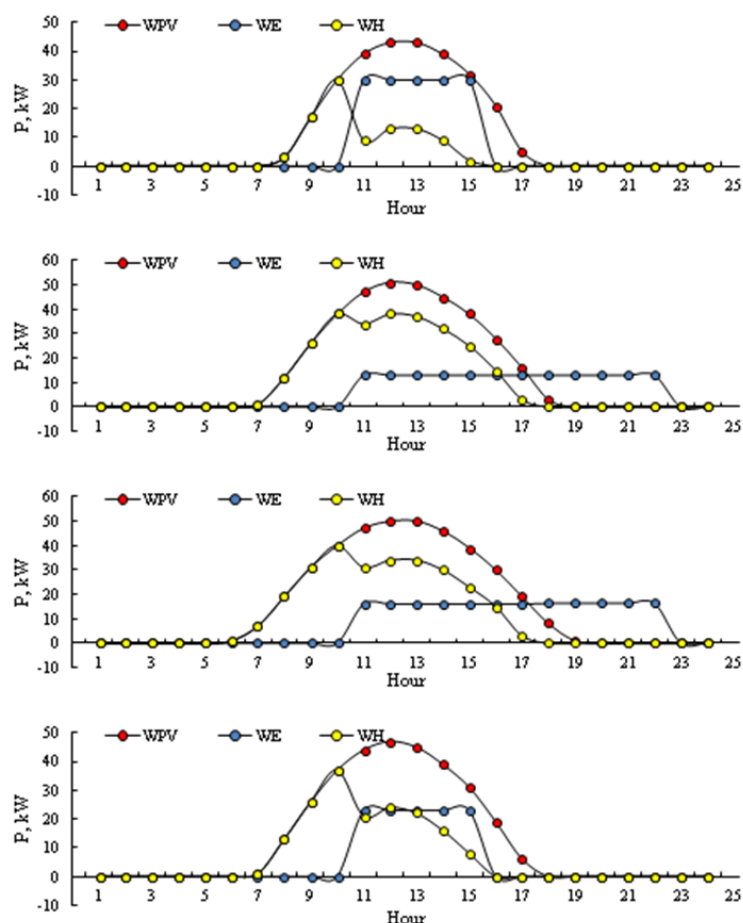


Рис. 3. Временные зависимости усреднённой энергии потребления электрических нагрузок WE, электронагревательных нагрузок WH и энергии генерации фотоэлектростанции WPV в течение средних суток сезонов года.

Fig. 3. Time dependence of the average energy of electrical loads WE, electrical heating loads WH and the generation energy of a photovoltaic power plant WPV during the average day of the seasons.

### Результаты

В результате исследований установлено, что электроэнергия массива фотоэлектрических модулей установленной мощностью 76 кВт, достаточно для полного обеспечения тренажерного зала электрической и тепловой энергией в весенний и летний сезоны. В осенне-зимний период фотоэлектрическая генерация не покрывает более половины необходимой объекту электроэнергии, поэтому в вечернее время рабочего дня электрические нагрузки необходимо обеспечивать электроэнергией от дополнительного энергоисточника.

Формирование оптимального алгоритма функционирования фотоэлектрической системы электроснабжения с электрохимическими и электротепловыми аккумуляторами и дополнительным источником энергии основывается на уравнении энергетического баланса:

$$WPV - WES + WDG = WE + WH. \quad (3)$$

где WPV, WES, WDG, WE, WH - соответственно, энергия фотоэлектрической генерации, энергия заряда или разряда аккумуляторной батареи, энергия дополнительного источника, электроэнергия электрических нагрузок, электроэнергия для горячего водоснабжения.

Особенностью фотоэлектростанций является генерация максимума мощности для текущей инсоляции при соответствующих значениях взаимоувязанных параметров тока и напряжения. В фотоэлектростанциях с электрохимическими аккумуляторами максимальная производительность достигается с помощью контроллеров заряда аккумуляторов, использующих технологию поиска точки максимальной мощности на вольт-амперных характеристиках фотоэлектрических модулей (так называемая MPPT технология).

В рассматриваемом случае электроэнергия фотоэлектростанции распределяется между электрическими нагрузками – через электрохимический аккумулятор с контроллером заряда и электротепловыми – через электротепловой контроллер.

Следовательно, возникает задача использования МРРТ технологий для таких энергосистем с целью повышения их энергоэффективности. Очевидно, что применение МРРТ технологии, при условии электропитания тепловых нагрузок отдельно от электрических (без использования аккумуляторов), возможно только для одного типа электрических нагрузок – тепловых. Контроллер заряда электрохимических аккумуляторов в этом случае может быть выполнен по технологии широтно-импульсной модуляции с простым методом заряда постоянным током. Электротепловой контроллер выполняется на основе регулятора мощности, обеспечивающего съём максимальной мощности с фотоэлектрических модулей для текущей инсоляции с учётом действующих электрических нагрузок.

Функциональная схема, реализующая рекомендованный выше принцип управления гибридным энергокомплексом приведена на рисунке 4.

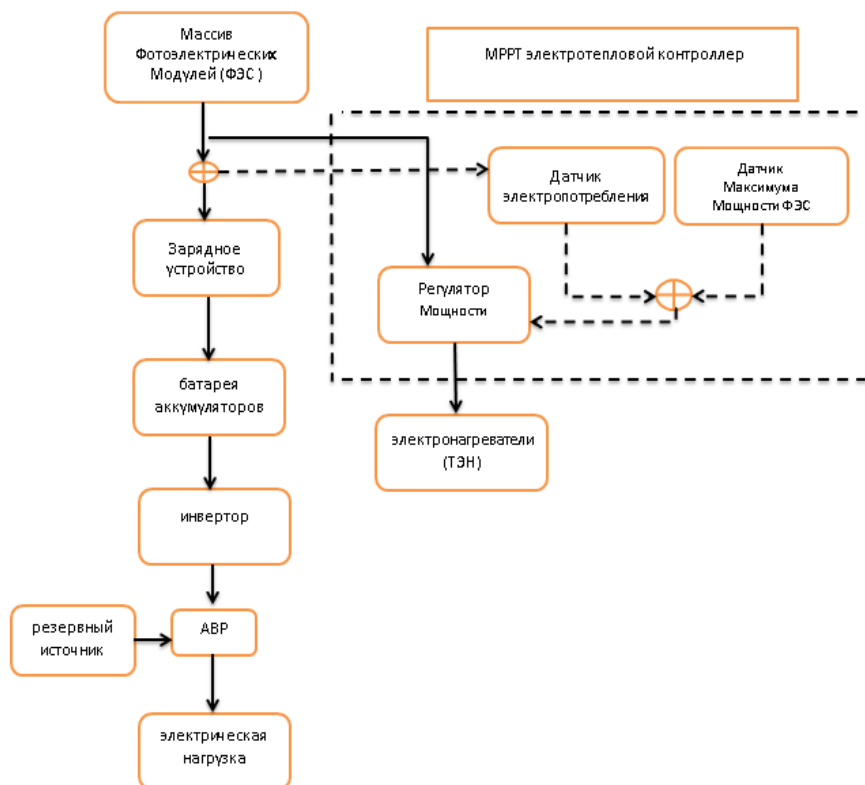


Рис.4. Функциональная схема гибридного фотоэлектрического комплекса.

Fig.4. Functional diagram of a hybrid photovoltaic complex.

Функционирование канала электропитания электрических нагрузок осуществляется обычным способом - последовательным преобразованием электроэнергии фотоэлектрических модулей: контроллер заряда, батарея аккумуляторов, инвертор и электрическая нагрузка с возможностью включения через АВР резервного источника энергии.

Алгоритм работы электротеплового канала основан на поддержании оптимального баланса мощностей системы электроснабжения путём добавления к текущей мощности электрических нагрузок, регулируемой мощности электронагревательных элементов до максимального приближения к потенциально возможной, для действующей инсоляции, мощности фотоэлектрической системы. Эту функцию выполняет регулятор мощности, задающим воздействием для которого является разность между текущими мощностями: максимально возможной, для действующей инсоляции, генерацией фотоэлектрических модулей и мощности, потребляемой в это время электрическими нагрузками. Определение потенциально возможной мощности фотоэлектрической системы для изменяющейся во времени энергии солнечного излучения и температуры для конкретных солнечных модулей осуществляется «Датчиком максимума мощности ФЭС». Мощность электрических нагрузок определяется «Датчиком электропотребления».

#### Обсуждение и заключение

Материалы исследований, приведённые в статье, являются оригинальными и обладают научной новизной. Отличительными особенностями результатов по сравнению с

известными публикациями по близкой тематике являются: обоснование применения электротепловых технологий для аккумулирования электроэнергии фото-электростанций, разработка МРРТ-алгоритма функционирования для тепловых контроллеров, разработка рекомендаций по построению фото-электростанций для обеспечения электрической и тепловой энергией социально-бытовых потребителей Ирака.

*Основные результаты можно резюмировать следующим образом:*

1. Для снижения стоимости фотоэлектростанций, питающих потребителей с высокой долей электротеплых нагрузок, например бытовые и социальные объекты, целесообразно питать электронагреватели непосредственно от массива фотоэлектрических модулей через специальные электротепловые контроллеры. Это позволяет снижать установленную мощность энергетического оборудования для питания только электрических нагрузок. Кроме того, использование систем аккумулирования солнечной энергии с электрохимическими и электротепловыми накопителями позволяет уменьшить запас энергии, необходимый для электрохимических батарей из-за высвобождения энергии, потребляемой тепловыми нагрузками. Особенно перспективно использование фотоэлектростанций с комбинированным аккумулированием в регионах с высоким энергетическим потенциалом солнечного излучения, в частности в Ираке.

2. Моделирование энергетических балансов фотоэлектрической системы электроснабжения с комбинированной системой аккумулирования, проведенное для разных сезонов года, показало, что предложенная технология позволяет полностью обеспечивать электричеством и горячей водой бытовые и социальные объекты Ирака большую часть времени. Дополнительный источник энергии потребуется на несколько часов в осенне – зимний период.

3. Реализация МРРТ технологий в предложенной фотоэлектрической системе электроснабжения имеет особенности, связанные с выделением тепловых нагрузок. Установлено, что обеспечение максимальной эффективности использования массива фотоэлектрических модулей, в рассматриваемой энергетической системе, целесообразно осуществлять путём использования электронагревательных элементов как управляемого потребителя – аккумулятора части генерируемой электроэнергии фотоэлектростанции, выделяемой для нагревания воды.

4. Предложен алгоритм функционирования фотоэлектростанций с электрохимическими и электротепловыми аккумуляторами. Будущие исследования в рассматриваемой области целесообразно посвятить более детальному рассмотрению МРРТ технологиям в подобных энергетических системах

### Литература

1. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение: статистика мирового рынка и особенности российского опыта // Теплоэнергетика. 2018. No 10. С. 78–88.
2. Свидерская О.В. Основы энергосбережения // ТетраСистемс. 2019. 176с.
3. Nazri N.S, et al. Energy economic analysis of photovoltaic thermal-thermoelectric (PVT-TE) air collectors // Renewable and Sustainable Energy Review. 2018. V. 92. pp. 187-97.
4. Эльмохлови А.Э., Очков В.Ф., Казанджан Б.И. оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21(1-2). С. 43-54.
5. Nazri N.S, et al. Mathematical modeling of photovoltaic thermal thermoelectric (PVT-TE) air collector // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. Vol. 9. N.2. pp. 795-802.
6. Fudholi A, et al. Review on energy and energy analysis of solar air heater // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. V. 9. no. 1. pp. 420-26.
7. Fudholi A., et al. Review on solar collector for agricultural produce // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. V. 9. no. 1. pp. 414-19.
8. Fudholi A., et al. Primary study of tracking photovoltaic system for a mobile station in Malaysia // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. V. 9(1). pp. 427-32.
9. Абасс А.З., Павлюченко, Д.А., Кобобель, И.В. Перспективы использования солнечной энергии в Ираке // Вестник Казанского Государственного Энергетического Университета. 2020.Т(45) №1.С. 63-70.
10. Абасс А.З., Павлюченко Д.А., Балабанов А.М., и др. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций ирака солнечной энергии как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны // Известия высших учебных заведений.

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22(2). С. 98-107.

11. 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. URL: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/simple/document/RU/TPU/book/376831>.

12. Секретарев Ю.А., Панова Я.В. Выбор и принятие Решений в электроэнергетике // Новосибирск, 2018.

13. Мировые тарифы: газ, бензин, и электроэнергия. Электронный ресурс. Доступно по URL: [antonio-merloni.ru/world-gas-tariffs](http://antonio-merloni.ru/world-gas-tariffs) (Ссылка активна на: 26.02.2022).

14. Пашкевич Р.И., Павлов К.А. Математическое моделирование комбинированной дизель-солнечной электростанции для децентрализованного электроснабжения потребителей // Электрические станции. Возобновляемая энергетика. 2019. № 9. С. 30–35.

15. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Максимов Н.А. Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро-солнечной электростанции // Промышленная энергетика. 2019. № 10. С. 47–53.

16. Лукутин Б.В. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. 115 с.

17. Ахмед З. Абасс, Павлюченко Д.А., Лесс В.М. Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 18–32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.

18. Iraq. Power engineering // Polpred.com. № 3607553. doi: [polpred.com>news/?cnt=618/sector=19](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32).

19. NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Available at: <http://www.instea.com/Solar/grid.cgi.htm> (accessed 26.02.2022).

20. Лукутин Б.В., Кадхим К.Х. Фотоэлектрические электростанции с электрохимическим и тепловым накопителем энергии в Ираке // Томского политехнического университета Geo Assets Engineering, 2021. Т. 332(1). С. 174–183.

#### Авторы публикации

**Лукутин Борис Владимирович** – д-р. техн. наук, профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Аль-Мажиди Каррар Хамид** – аспирант, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

#### Reference

1. Butuzov VA. Solar heat supply: statistics of the world market and features of the Russian experience. *Teploenergetika* 2018;10:78–88.

2. Sviderskaya OV. *Fundamentals of energy saving* / TetraSystems, 2019. 176 p.

3. NS. Nazri, et al. *Energy economic analysis of photovoltaic thermal-thermoelectric (PVT-TE) air collectors*. Renewable and Sustainable Energy Review. 2018; 92:187-97, 2018.

4. Elmohlawy AE, Ochkov VF, Kazandzhan BI. Evaluation of the performance and energy efficiency of integrated solar combined cycle power plant. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):43-54. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-43-54>.

5. N.S. Nazri, et al. Mathematical modeling of photovoltaic thermal thermoelectric (PVT-TE) air collector. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2018;9(2):795-802.

6. A. Fudholi, et al. Review on exergy and energy analysis of solar air heater. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018;9(1):420-26, 2018.

7. A. Fudholi, et al. Review on solar collector for agricultural produce. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018;9(1):414-19, 2018.

8. A. Fudholi, et al. Primary study of tracking photovoltaic system for a mobile station in Malaysia. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018;9(1): 427-32.

9. Abass AZ, Pavlyuchenko DA, Kobobel I.V. Prospects for the use of solar energy in Iraq. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2020;1(45):63-70.

10. Ahmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A, Balabanov A.M, VM. Less. Inclusion of solar energy in iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):98-107. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-98-107.
11. Lukutin BV, Muravyov DI. Prospects for decentralized DC power supply systems with distributed solar generation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(6). Available at: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/simple/document/RU/TPU/book/376831> (accessed 15 November 2020).
12. Sekretarev YuA, Panova YaV. *Choice and decision-making in the electric power industry*. Novosibirsk, 2018.
13. *World Tariffs: Gas, Gasoline, and Electricity*. Available at: [anto-nio-merloni.ru/world-gas-tariffs](http://anto-nio-merloni.ru/world-gas-tariffs) (accessed 26.02.2022).
14. Pashkevich RI, Pavlov KA. *Mathematical modeling of a combined diesel-solar power plant for decentralized power supply to consumers*. Electric Stations. Renewable Energy 2019;9:30-35.
15. Lavrik AYU, Zhukovsky YuL, Maksimov N.A. *Determination of the optimal composition of a backup hybrid wind-solar power plant*. Industrial Energy. 2019;10:47–53.
16. Lukutin BV. *Intelligent power supply systems with wind and solar power plants*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 2019. 115 p.
17. Akhmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A., Less V.M. *Mathematical model of the optimal placement of a hybrid power plant with a combined cycle*. journal of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2021;23(1):18-32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.
18. Iraq. *Power engineering*. Polpred.com. № 3607553. doi: [polpred.com>news/?cnt=618/sector=19](https://polpred.com/news/?cnt=618/sector=19).
19. NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Available at: [www.instesre.com/Solar/grid.cgi.htm](http://www.instesre.com/Solar/grid.cgi.htm) (accessed 26.02.2022).
20. Lukutin BV, Kadhim KH. *Photovoltaic Power Plants With Electrochemical And Thermal Energy Storage In Iraq*. The Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. 2021;332(1):174-183.

#### **Authors of the publication**

**Boris V. Lukutin** – National Research Tomsk Polytechnic University.

**Karrar Hameed Kadhim** – National Research Tomsk Polytechnic University.

**Получено** **20.03.2022г.**

**Отредактировано** **04.04.2022г.**

**Принято** **11.04.2022г.**