

Фотоника

УДК 621.389

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-73-85>

Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера

И. А. Ламкин, А. Э. Дегтерев[✉], И. И. Михайлов,
М. М. Романович, Н. О. Патоков, С. А. Тарасов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] aedegterev@etu.ru

Аннотация

Введение. На сегодняшний день стремительно ухудшающееся состояние экологии требует инновационных решений для обеспечения электрической энергией различных устройств и систем. В связи с этим происходит постепенный переход на возобновляемые источники энергии, разновидностью которых является солнечная энергия. В данной статье описан Wi-Fi-роутер с питанием от современных фотоэлектрических преобразователей.

Цель работы. Разработка Wi-Fi-роутера с питанием от современных фотоэлектрических преобразователей.

Материалы и методы. Система была разработана на основе Wi-Fi-роутера YF360-N и фотовольтаического элемента HVL-105/O.

Результаты. Приведен расчет фотоэлектрической системы. Исследованы вольт-амперные и ватт-амперные характеристики солнечной панели. Разработана схема питания от солнечной панели. Эффективность преобразования на рабочем участке составила 90 %. Определена емкость внешнего аккумулятора для автономной работы системы в течение 7 дней. Моделирование в среде MatLab продемонстрировало высокую эффективность разработанной системы.

Заключение. Расчет фактически генерируемой фотоэлектрической системой энергии показал, что фотовольтаический элемент HVL-105/O может применяться для питания Wi-Fi-роутера YF360-N при самых неблагоприятных для солнечных элементов погодных условиях.

Ключевые слова: фотовольтаическая ячейка, Wi-Fi-роутер, солнечный элемент, инсоляция

Для цитирования: Использование фотовольтаических элементов для автономного энергообеспечения приборов радиоэлектроники на примере Wi-Fi-роутера / И. А. Ламкин, А. Э. Дегтерев, И. И. Михайлов, М. М. Романович, Н. О. Патоков, С. А. Тарасов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 73–85. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-73-85

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2020-0008, который выполнялся в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01024-21-00.

Статья поступила в редакцию 19.04.2022; принята к публикации после рецензирования 23.05.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router

Ivan A. Lamkin, Alexander E. Degterev, Ivan I. Mikhailov,
Maria M. Romanovich, Nikita O. Patokov, Sergey A. Tarasov ✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aedegterev@etu.ru

Abstract

Introduction. In view of growing environmental concerns, innovative solutions to ensure electrical energy supply to various devices and systems are required. As a result, renewable energy sources, including those based on solar energy, are attracting much attention. In this context, the development of a Wi-Fi router powered by modern photovoltaic converters seems to be a relevant research task.

Aim. Development of a Wi-Fi router powered by modern photovoltaic converters.

Materials and methods. The proposed system was developed on the basis of a Wi-Fi router YF360-H and a photovoltaic cell HVL-105/O.

Results. Calculations of the developed photovoltaic system were performed; volt-ampere and watt-ampere characteristics of the solar panel were investigated. The solar panel power supply circuit was developed, with the conversion efficiency in the working area achieving 90 %. The capacity of the external battery ensuring the system's autonomous operation for 7 days was determined. A modeling experiment in the MATLAB environment demonstrated the high efficiency of the developed system.

Conclusion. According to the conducted calculations, a HVL-105/O photovoltaic cell can be used to power a Wi-Fi router YF360-H under the weather conditions considered most unfavorable for solar cells.

Keywords: photovoltaic cell, Wi-Fi router, solar panel, insolation

For citation: Lamkin I. A., Degterev A. E., Mikhailov I. I., Romanovich M. M., Patokov N. O., Tarasov S. A. The Use of Photovoltaic Cells for Autonomous Power Supply of Radio Electronic Devices on the Example of a Wi-Fi Router. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 73–85. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-73-85

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of financing. The study was carried out within the framework of project no. FSEE-2020-0008, which was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. 075-01024-21-00.

Submitted 19.04.2022; accepted 23.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. На сегодняшний день солнечная энергия – это перспективное направление развития альтернативной энергетики. Энергия солнца уже широко применяется для обеспечения электричеством зданий, летательных аппаратов, бытовых устройств и т. п. Описанная в статье система предназначена для обеспечения интернет-связью зданий, улиц, зон отдыха, парков, сельской местности и труднодоступных мест, где отсутствуют другие источники электрической энергии. На фоне мировой тенденции перехода на возобновляемые источники энергии система имеет большой потенциал для применения как в некоммерческих целях,

так и для обеспечения "экологичным интернетом" офисов и предприятий.

Исследование. Расчет фотоэлектрической системы. Объединение Wi-Fi-роутера с солнечной панелью (СП) позволяет обеспечить интернет-соединением как улицы, где уже широко распространены разные устройства с питанием от СП, так и здания. Аналогично можно обеспечить интернет-соединение при отсутствии других потенциальных источников энергии. На рис. 1 представлена схема фотовольтаической системы. Важными условиями для расчета фотоэлектрической системы являются: определение общего тока нагрузки и времени

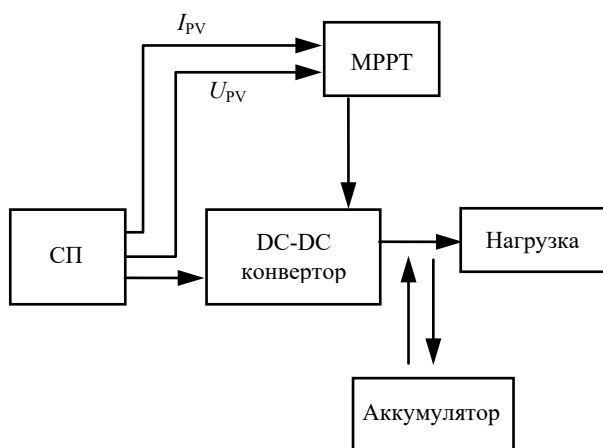


Рис. 1. Схематичное изображение фотовольтаической системы

Fig. 1. Schematic representation of a photovoltaic system

работы; определение потерь; расчет солнечной инсоляции; требования к фотовольтаическим ячейкам (ФВЯ); расчет емкости аккумуляторов; выбор подходящего МРРТ (Maximum Power Point Tracking)-контроллера.

Проведем расчет фотовольтаической системы для рассматриваемого роутера YF360-N. Прежде, чем перейти к определению тока нагрузки, необходимо выбрать рабочее напряжение фотовольтаического элемента. Чаще всего встречаются значения в 12, 24 и 48 В. Следующим шагом после определения напряжения является определение необходимой энергии в виде произведения тока и среднего времени функционирования, измеряемого в ампер-часах. В случае потребления нагрузкой постоянного тока необходимая суточная энергия (в ватт-часах) определяется произведением номинальной мощности и времени функционирования за сутки [1, 2].

Фотовольтаическая система должна обеспечивать стабильную работу Wi-Fi-роутера в течение рабочего дня. Номинальное напряжение СП составляет 48 В. Мощность устройства

$$W = IU = 1.5 \cdot 24 = 36 \text{ Вт},$$

где I – сила тока; U – напряжение.

За 15 ч потребляемая мощность

$$W_h = Wt = 36 \cdot 15 = 540 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

где t – время.

Необходимая за 15 ч энергия

$$A_h = \frac{W_h}{U} = \frac{540 \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{48 \text{ В}} = 11.25 \text{ А} \cdot \text{ч},$$

где A_h – запасаемая энергия.

Некоторые компоненты фотовольтаической системы, такие, как аккумуляторы, регуляторы заряда, для своего функционирования также потребляют энергию. Потребленная самой системой энергия считается энергетической потерей системы. Для учета таких потерь в системе следует к уже рассчитанной энергии прибавить 20...30 % от нее:

$$A_h = A_h \cdot 1.2 = 11.25 \cdot 1.2 = 13.5 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

На количество сгенерированной ФВЯ энергии влияет множество факторов, таких, как погодные условия, время года, инсоляция. Солнечный элемент должен быть установлен под оптимальным углом для получения максимальной производительности [3].

Среднегодовая солнечная инсоляция на горизонтальную поверхность в Санкт-Петербурге составляет 930 кВт·ч/м², а при усредненном оптимальном угле наклона – 1243 кВт·ч/м² [5]. Количество солнечных часов при этом составляет $h = 1243/365 = 3.4$ ч. Сгенерированный ток определяется отношением полной энергии к количеству солнечных часов за сутки. Таким образом:

$$I = \frac{A_h}{h} = \frac{13.5 \text{ А} \cdot \text{ч}}{3.4 \text{ ч}} = 3.8 \text{ А},$$

где h – количество солнечных часов.

Производители фотовольтаических модулей выпускают устройства с разной выходной мощностью. При оптимальных условиях требуемый ток, который был рассчитан выше, можно получить с помощью минимального количества модулей. Модули могут быть соединены как последовательно, так и параллельно. При последовательном соединении увеличивается номинальное напряжение, а при параллельном – ток.

Требуемое количество модулей, включенных параллельно, определяется отношением полного тока нагрузки (с учетом потерь) и тока в рабочей точке максимальной мощности. Количество модулей при последовательном соединении определяется отношением номи-

нального напряжения устройства и напряжения в рабочей точке. Число модулей равно произведению количества модулей при параллельном и последовательном соединениях.

Для получения требуемой энергии 540 Вт·ч используется солнечный модуль HVL-105/O с номинальной мощностью 105 Вт. Это тонкопленочные, микроморфные, инновационные фотовольтаические элементы, представляющие собой гетероструктуру, в которой на слой аморфного кремния наносится тонкий слой кристаллического кремния толщиной 25 нм. Данные ФВЯ способны преобразовывать не только видимый свет, но и инфракрасный. Преимуществами данных фотовольтаических элементов также являются:

- значительное снижение цены (15...20 %) из-за дешевой технологии производства;
- низкая скорость деградации. Через 10 лет эффективность снижается не более чем на 10 %, а за 25 лет – 25 %. Это вызвано уменьшением толщины слоя аморфного кремния;
- минимальное падение производительности при высоких температурах;
- при низкой инсоляции данные ФВЯ обеспечивают большую эффективность, чем фотовольтаические элементы из кристаллического кремния. Данная особенность являлась ключевой при выборе ФВЯ, так как в Санкт-Петербурге бывает всего от 31 до 62 солнечных дней.

Количество требуемых модулей в параллельном соединении:

$$\frac{I}{I_{\text{mpp}}} = \frac{3.8 \text{ A}}{2.06 \text{ A}} = 1.87 > 1,$$

где I_{mpp} – ток в точке максимальной мощности.

Номинальное напряжение устройства составляет 24 В, следовательно, количество модулей в последовательном соединении:

$$\frac{U}{U_{\text{mpp}}} = \frac{24 \text{ В}}{51 \text{ В}} = 0.47 < 1,$$

где U_{mpp} – напряжение в точке максимальной мощности.

Другими словами, для питания роутера необходимо 2 модуля HVL-105/O, включенных параллельно. Для получения максимальной эффективности надо разместить фотовольтаический элемент под соответствующим углом. Как правило, этот угол близок к значению угла широты, на которой находится ФВЯ. Значения инсоляции H под оптимальными углами приведены в таблице и наглядно продемонстрированы на рис. 2. Для определения "наклонной" инсоляции применяется формула

$$H_j = H_i / \cos \theta, \quad (1)$$

где H_j – "наклонная" инсоляция, кВт·ч/(м²·год);
 H_i – инсоляция на горизонтально располо-

Уровень инсоляции в течение года и оптимальный угол наклона солнечного элемента [4]

Yearly variations in the insolation level and optimal angles of the solar cell inclination [4]

Месяц	Количество дней	Оптимальный угол наклона, ...°	Дневная сумма солнечной инсоляции, кВт·ч/м ²	Месячная сумма солнечной инсоляции кВт·ч/м ²
Январь	31	76	1.13	35.03
Февраль	28	67	2.31	64.68
Март	31	54	3.5	108.5
Апрель	30	38	4.57	137.1
Май	31	23	5.52	171.12
Июнь	30	14	5.76	172.8
Июль	31	16	5.51	170.81
Август	31	30	4.67	144.77
Сентябрь	30	48	3.34	100.2
Октябрь	31	62	2.16	66.96
Ноябрь	30	74	1.46	43.8
Декабрь	31	79	0.87	26.97
Среднее	–	48.3	3.4	103.56
Сумма	–	–	–	1242.74

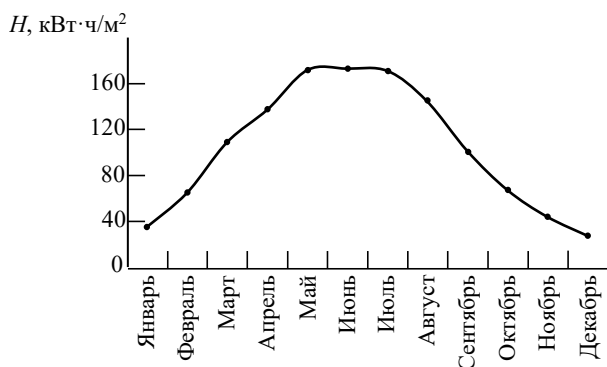


Рис. 2. Изменение уровня инсоляции в Санкт-Петербурге в течение года

Fig. 2. Yearly variations in the level of insolation in St Petersburg

женном ФВЯ, кВт·ч/(м²·год); θ – широта. Фактически сгенерированная фотоэлектрической системой энергия рассчитывается по формуле

$$W = W_u H_g H_j,$$

где W_u – номинальная мощность; H_g – эффективность системы. Номинальная мощность одной панели HVL-105/O составляет 105 Вт. Эффективность системы обычно составляет примерно 70 % (потери на конверторе – 8 %; потери на загрязнении поверхности – 7 %; температурные потери – 15 %). Наклонная иррадиация равна 1243 кВт·ч/(м²·год) (см. таблицу).

Тогда

$$\begin{aligned} W &= (2I_{\text{mpp}}) U_{\text{mpp}} H_g H_j = \\ &= (2 \cdot 2.06) \cdot 51 \cdot 0.7 \cdot 1243 = 183 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Итак, при установке фотовольтаического элемента с номинальной мощностью 105 Вт в условиях Санкт-Петербурга сгенерированная мощность составит 183 кВт·ч/год. Учитывая наличие аккумулятора, можно утверждать, что система способна обеспечить питание роутера в декабре, когда наблюдается наименьший уровень инсоляции.

Важным компонентом фотоэлектрической системы являются аккумуляторы, которые обеспечивают функционирование подключенных устройств в ночное время или при низкой инсоляции. Период, при котором питание нагрузки не зависит от сгенерированного модулем тока, называется периодом автономной работы. Этот период зависит от типа нагрузки

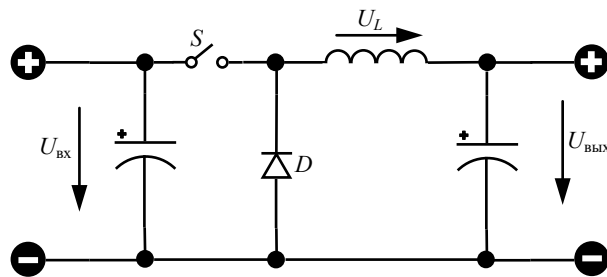


Рис. 3. Схема понижающего преобразователя

Fig. 3. Buck converter circuit

и погодных условий и может составлять сутки и более [6].

Емкость аккумулятора равна произведению дневной потребляемой энергии (включая потери) и количества дней автономной работы:

$$A_{\text{bat}} = A_h t = 13.5 \cdot 7 = 94.5 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Чтобы продлить срок эксплуатации аккумуляторов, рекомендуется использовать 80 % от его емкости. Требуемая мощность при этом составит

$$A_{\text{bat}} = \frac{94.5 \text{ А} \cdot \text{ч}}{0.8} = 118 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Для осуществления заряда аккумуляторов используются специальные MPPT-контроллеры. Типичная схема понижающего преобразователя представлена на рис. 3. Он состоит из катушки, диода, ключа, выходного и входного конденсаторов.

Данная схема предназначена для уменьшения потерь при преобразовании напряжения. Преобразование происходит посредством передачи порций энергии в нагрузку. Вместо ключа часто применяется либо MOSFET-, либо IGBT-транзистор, переключениями которого и обусловлена передача энергии. Частота переключения задается контроллером, подключенным к затвору.

Схема имеет 2 режима работы: при замкнутом ключе и при разомкнутом ключе. Когда ключ замкнут, в преобразователь и нагрузку передается энергия от источника питания. Она сразу начинает запасаться катушкой (конденсатор подпитывает нагрузку), а позднее, когда ток через катушку превысит выходной ток, передаваемая энергия начинает запасаться и конденсатором. Напряжение на катоде диода

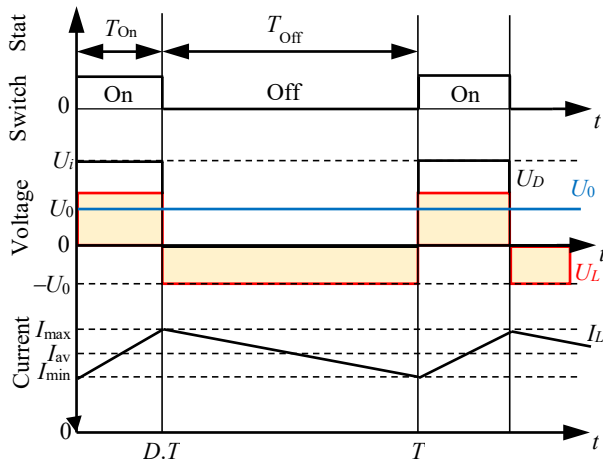


Рис. 4. Графики входных и выходных токов и напряжений
 Fig. 4. Graphs of input and output currents and voltages

при этом равно напряжению питания, соответственно падение на катушке постоянно и равно:

$$U_{L(\text{вкл})} = U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}};$$

$$I_{C(\text{вкл})} = I_L - I_{\text{вых}},$$

где $U_{L(\text{вкл})}$ – падение напряжения на катушке при замкнутом ключе; $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение; $I_{C(\text{вкл})}$ – сила тока на катушке при замкнутом ключе; I_L – ток, проходящий через катушку; $I_{\text{вых}}$ – выходной ток.

Диод в это время закрыт, поскольку напряжение на катоде больше, чем на аноде [7, 8].

На рис. 4 изображены графики входных и выходных токов и напряжений. Когда ключ разомкнут, энергия от источника питания в нагрузку и преобразователь не передается. При этом сначала начинает расходоваться энергия, запасенная в катушке (и на нагрузку, и на продолжение заряда конденсатора), а потом, когда ток через катушку становится меньше выходного тока, конденсатор тоже начинает отдавать запасенную энергию [9]. При этом:

$$U_{L(\text{выкл})} + U_{\text{вых}} = 0;$$

$$U_{L(\text{выкл})} = -U_{\text{вых}};$$

$$I_{C(\text{выкл})} = I_L - I_{\text{вых}},$$

где $U_{L(\text{выкл})}$ – падение напряжения на катушке при разомкнутом ключе; $I_{C(\text{выкл})}$ – сила тока на катушке при разомкнутом ключе.

Следовательно:

$$U_{L(\text{вкл})}T_{\text{вкл}} + U_{L(\text{выкл})}T_{\text{выкл}} = 0;$$

$$(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})DT + (-U_{\text{вых}})(1-D)T = 0;$$

$$U_{\text{вых}} = DU_{\text{вх}},$$

где $T_{\text{вкл}}$ – время включенного состояния; $T_{\text{выкл}}$ – время выключенного состояния; D – скважность; T – период;

$$D = \frac{T_{\text{вкл}}}{T} \Rightarrow T_{\text{вкл}} = DT;$$

$$U_{\text{вх}} = 51 \text{ В}; U_{\text{вых}} = 24 \text{ В}; W_{\text{max}} = 105.06 \text{ Вт};$$

$$f_{\text{sw}} = 5000 \text{ Гц}; \Delta I_L = 20 \%; \Delta U_C = 2 \%;$$

$$r = 16 \text{ Ом}.$$

Здесь W_{max} – максимальная мощность; f_{sw} – частота переключения; ΔI_L – амплитуда пульсаций тока; ΔU_C – амплитуда пульсаций напряжения; r – сопротивление.

Определение скважности:

$$D = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{51}{24} = 0.471.$$

Определение тока через катушку:

$$I_L = \frac{U_{\text{вых}}}{r} = 1.5 \text{ А}.$$

Определение амплитуды пульсаций тока на катушке:

$$\Delta I_L = 0.2 \cdot 1.5 = 0.3 \text{ А}.$$

Определение индуктивности катушки:

$$L = \frac{U_{\text{вх}}(1-D)D}{\Delta I_L f_{\text{sw}}^2} = 8.47 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Определение амплитуды пульсаций напряжения на конденсаторе (2 % от $U_{\text{вых}}$):

$$\Delta U_C = 0.02 \cdot 24 = 0.48.$$

Определение емкости конденсатора:

$$C = \frac{U_{\text{вх}}(1-D)D}{8L\Delta U_C f_{\text{sw}}^2} = 1.563 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}.$$

Отслеживание точки максимальной мощности. На вольт-амперной характеристике ФВЯ существует точка с координатами

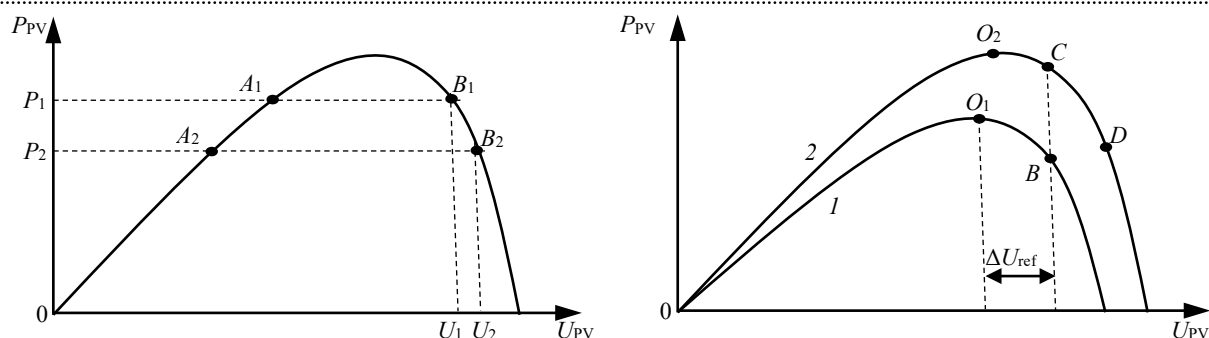


Рис. 5. Принцип работы алгоритма возмущения и наблюдения
 Fig. 5. Operational principles of the perturbation and observation algorithm

($U_{\text{mpp}}, I_{\text{mpp}}$), в которой ее выходная мощность максимальна. В связи с этим для достижения максимальной эффективности необходимо использование устройств для слежения за точкой максимальной мощности. Отслеживание максимальной мощности происходит с помощью так называемых МРРТ-контроллеров. На сегодняшний день на рынке представлено большое количество таких устройств. Оптимальным вариантом является Wincong sl03-4830a – современный контроллер для солнечных фотоэлектрических систем с встроенным жидкокристаллическим табло, обладающий рядом важных функций. Высокая надежность, качество исполнения и приемлемая цена делают его вполне подходящим вариантом. Преимуществами данной системы являются:

- поддержка максимальной выходной мощности без ее снижения при температуре окружающей среды до 50 °С;
- встроенный алгоритм контроля энергии в аккумуляторе отслеживает отдаваемую и потребляемую энергию, на основе чего рассчитывается оставшаяся в аккумуляторе энергия. Осуществляется с помощью интеллектуального контроллера солнечного заряда SL03;
- точная зарядка аккумуляторов напряжением 36 В/48 В/60 В с простой настройкой параметров.

Существует большое количество алгоритмов, которые могут лежать в основе МРРТ-контроллера (метод постоянного напряжения; метод холостого хода; метод короткого замыкания; алгоритм возмущения и наблюдения; алгоритм возрастающей проводимости). В данной статье рассматривается метод возмущения и наблюдения (P&O). Принцип работы алгоритма возмущения и наблюдения представлен на рис. 5. Данный метод предполагает увеличение или уменьшение опорного напряжения ΔU_{ref} фотоэлектрической си-

стемы с целью возмущения системы через равные промежутки времени и дальнейшее сравнение выходной мощности солнечного модуля на k -м и $(k - 1)$ -м этапах работы [3].

Если при изменении выходного напряжения солнечного модуля на k -м интервале измерения его мощность возрастает (переходы $A_2 \rightarrow A_1$, $B_2 \rightarrow B_1$ на рис. 5), то система управления продолжает перемещать рабочую точку солнечного модуля в этом направлении; в противном случае знак приращения опорного напряжения ΔU_{ref} изменяется, и рабочая точка солнечного модуля перемещается в противоположном направлении. Кривые 1 и 2 на рис. 5 соответствуют различным уровням инсоляции и отображают отклонение от правильного поиска точки максимальной мощности. O_1 является точкой максимальной мощности на кривой 1. При увеличении опорного напряжения точка O_1 сместится в рабочую точку B . При увеличении освещенности (кривая 2) новой рабочей точкой окажется точка C . В таком случае приращение мощности принимается алгоритмом в виде результата возмущения. Направление приращения сохраняется, что приводит к образованию более отдаленной от истинной точки максимальной мощности O_2 точки D . На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма возмущения и наблюдения. На каждом следующем этапе возмущения алгоритм продолжает работать таким же образом, как описано ранее. Основным преимуществом такого подхода является простота реализации алгоритма [10–13].

Результаты моделирования. Для моделирования фотоэлектрической системы использовалась среда MatLab [14, 15]. Система состоит из СП, преобразователя с понижением напряжения, устройства отслеживания точки максимальной мощности, аккумулятора. Также представлена

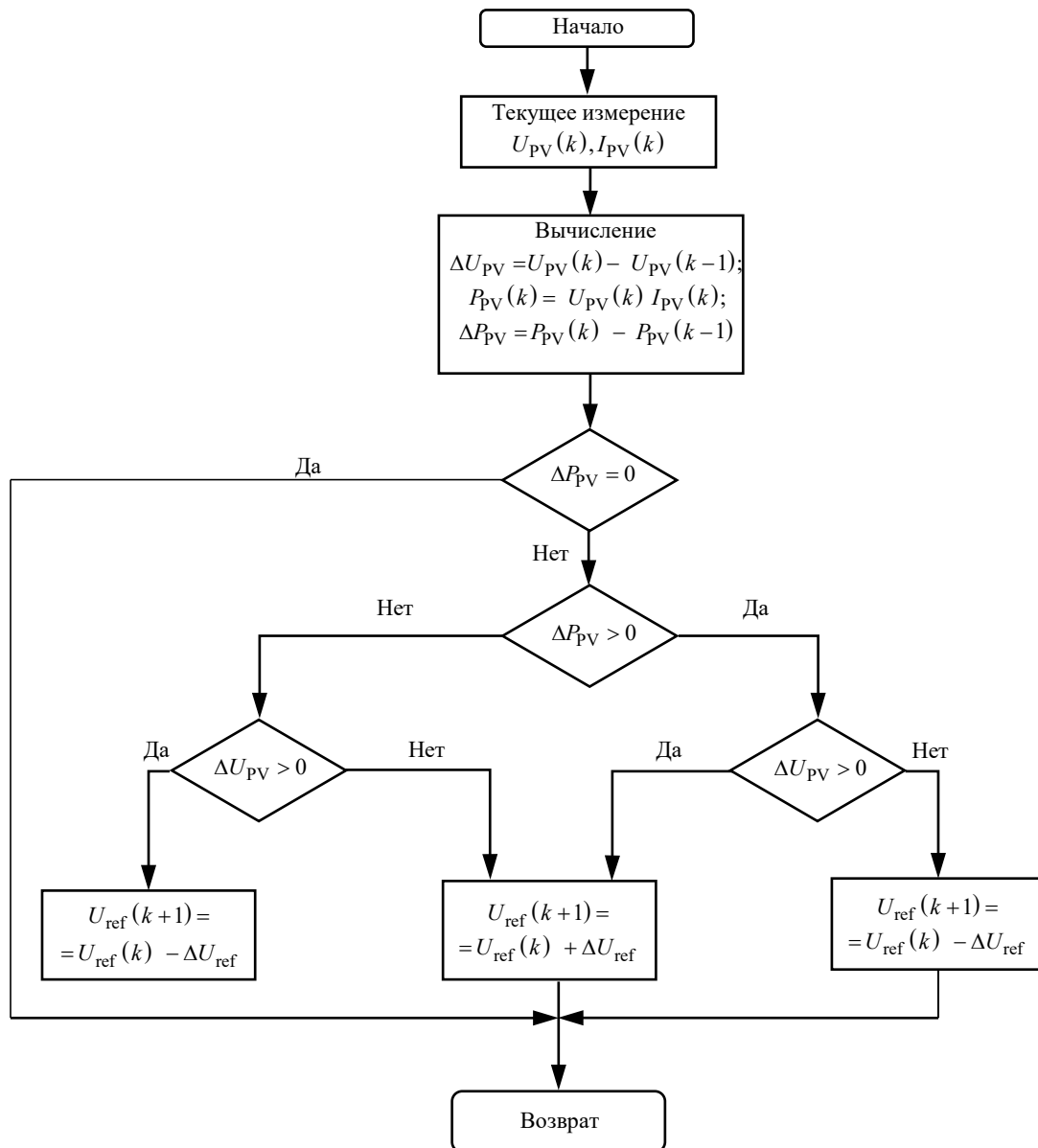


Рис. 6. Блок-схема алгоритма возмущения и наблюдения [13]

Fig. 6. Block diagram of the perturbation and observation algorithm

схема для определения эффективности преобразования энергии. Смоделировано действие типичной для Санкт-Петербурга солнечной инсоляции, установлена температура в 25 °С. Для моделирования СП был выбран модуль "PV array", изображенный на рис. 7, где выбраны параметры для соответствующей панели.

Модуль "PV array" имеет 2 входа для температуры и инсоляции и 3 выхода: измерение, положительный и отрицательный потенциалы. С помощью команды "Plot" в окне модуля "PV array" были получены вольт-амперные и ватт-амперные характеристики

СП HVL-105/O при уровнях инсоляции 1000, 500 и 100 Вт/м² (рис. 8).

Также были получены температурные зависимости СП при 45, 25 и 10 °С при неизменной инсоляции в 1000 Вт/м² (рис. 9).

Далее рассчитаем коэффициент заполнения для данной СП:

$$FF = \frac{U_{\text{mpp}} I_{\text{mpp}}}{U_{\text{oc}} I_{\text{sc}}} = \frac{2.06 \cdot 51}{2.6 \cdot 70} = \frac{105.06}{182} = 58 \%,$$

где FF – коэффициент заполнения; U_{mpp} – напряжение в точке максимальной мощности; I_{mpp} – ток в точке максимальной мощности;

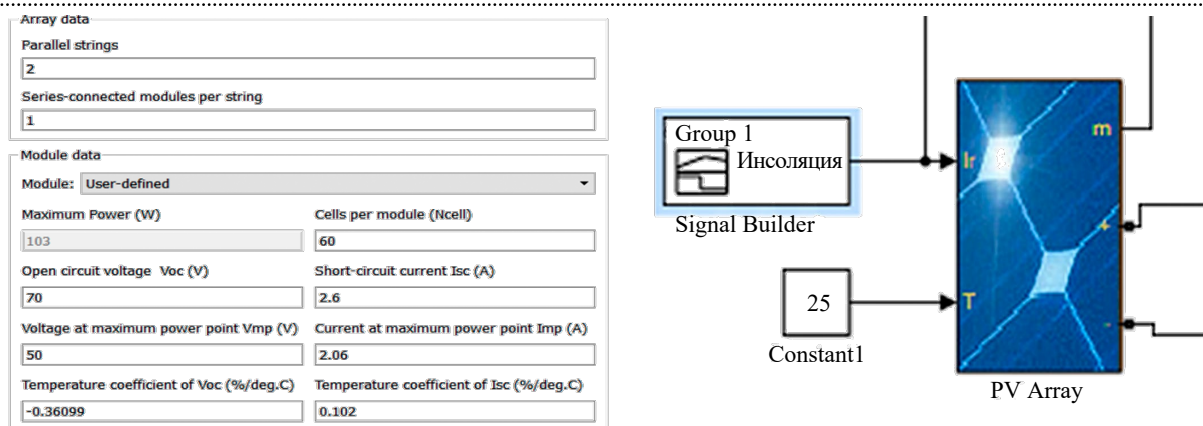


Рис. 7. Введенные параметры солнечного элемента

Fig. 7. Entered parameters of the solar cell

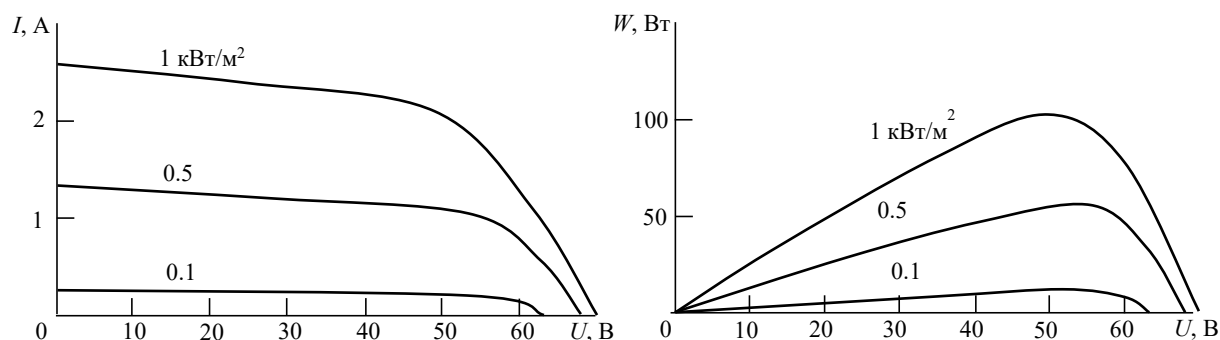


Рис. 8. Вольт-амперные и ватт-амперные характеристики HVL-105/O

Fig. 8. Volt-ampere and watt-ampere characteristics of HVL-105/O

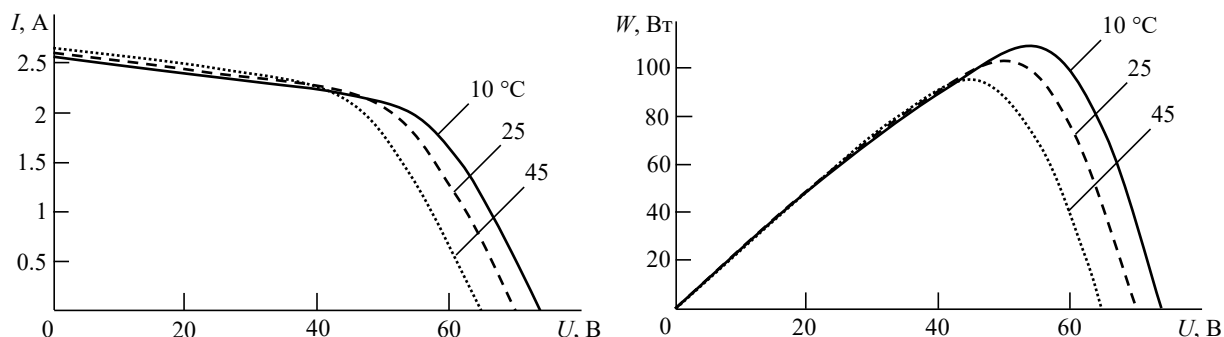


Рис. 9. Вольт-амперные и ватт-амперные характеристики HVL-105/O при разных температурах и постоянной инсоляции

Fig. 9. Volt-ampere and watt-ampere characteristics of HVL-105/O at different temperatures and permanent insolation

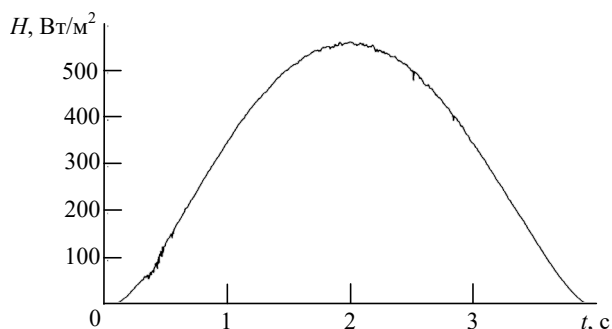


Рис. 10. График изменения уровня солнечной инсоляции

Fig. 10. Variations in the level of solar insolation

U_{oc} – напряжение холостого хода; I_{sc} – ток короткого замыкания.

График изменения уровня инсоляции представлен на рис. 10. Он был получен с помощью модуля "Signal builder". Из-за долгого времени компиляции инсоляция за весь день представлена в четырех секундах, что оказалось достаточным для демонстрации работоспособности системы.

Для моделирования отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) был выбран модуль "MatLab function". С его помощью можно использовать код MatLab в среде моделиро-

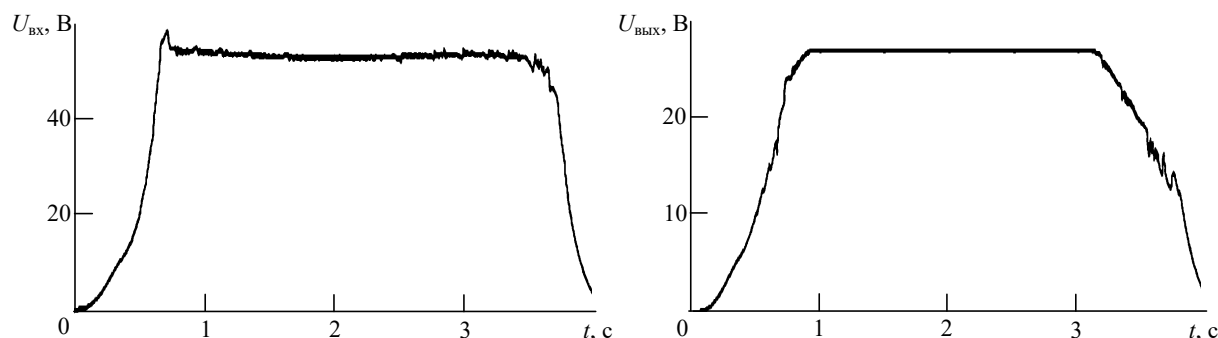


Рис. 11. Входное и выходное напряжения

Fig. 11. Input and output voltage

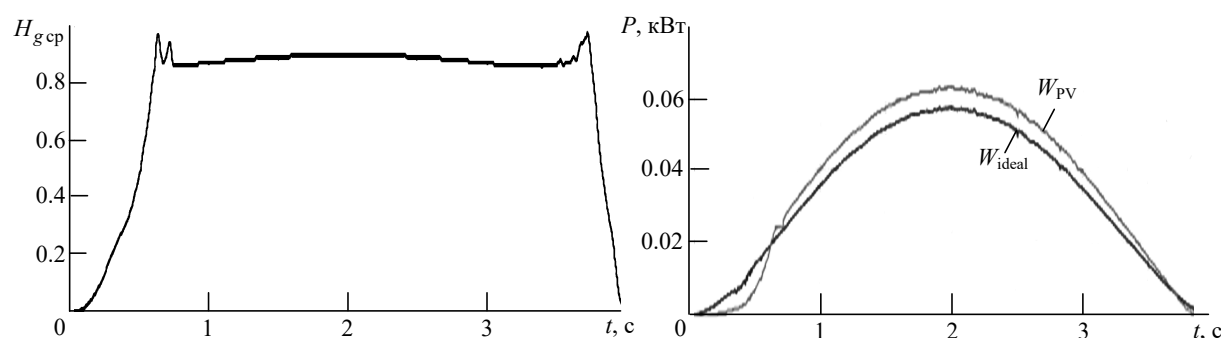


Рис. 12. Эффективность преобразования

Fig. 12. Conversion efficiency

вания Simulink. Входные и выходные переменные в коде MatLab преобразуются во входные и выходные сигналы в Simulink.

Блок содержит также модуль "PWM Generator", который обеспечивает частоту 5000 Гц. В результате моделирования были получены временные зависимости для входного и выходного напряжений (рис. 11).

Из полученных графиков видно, что выходное напряжение поддерживается на уровне 25...26 В, что применимо для питания роутера. Для определения эффективности преобразования были смоделированы графики теоретической и фактической мощностей. Результаты моделирования представлены на рис. 12, где W_{ideal} – теоретическая мощность; W_{PV} – фактическая мощность.

Из полученных зависимостей видно, что эффективность системы на рабочем участке составляет 90 %. В качестве внешнего аккумулятора используется модуль "Battery". В зависимости от уровня заряда происходит переключение между аккумулятором и выходным напряжением СП так, чтобы заряд аккумулятора не опускался ниже 20 % и не превышал 80 %. Этим способом можно значительно продлить срок службы аккумулятора.

Переключение между аккумуляторами осуществляется с помощью блока SWITCH1. При низком уровне заряда аккумулятора включена его зарядка ($SW1 = 1$). Когда значение на выходе конвертора превышает 22 В, происходит его подключение к нагрузке ($SW2 = 0 \rightarrow 1$), аккумулятор при этом отключен ($SW3 = 0$). При уровне заряда 55 % (< 80 %) заряд аккумулятора продолжается ($SW1 = 1$). Питание нагрузки при низком выходном напряжении осуществляется аккумулятором, а далее (при увеличении выходного напряжения) происходит отключение аккумулятора от нагрузки и подключение к нему выходного напряжения ($SW2 = 0 \rightarrow 1$, $SW3 = 1 \rightarrow 0$). Переключение между источниками питания занимает 0.3 с. При низком выходном напряжении видно уменьшение заряда аккумулятора из-за его разряда на нагрузку. Далее происходит переключение, при котором аккумулятор начинает заряжаться, а питание нагрузки осуществляется выходным напряжением фотовольтаического элемента. При уменьшении выходного напряжения происходит обратное переключение.

Закключение. Согласно расчетам коэффициент заполнения фотовольтаического элемен-

та HVL-105/O составляет 58 %, уступая многим другим видам ФВЯ, но его низкая цена и другие преимущества делают его наиболее подходящим вариантом. Расчет фактически генерируемой фотоэлектрической системой энергии по (1) показал, что данная ФВЯ может применяться для питания Wi-Fi-роутера YF360-H при самых неблагоприятных для солнечных элементов погодных условиях. Были исследованы вольт-амперные и ватт-амперные

характеристики фотовольтаического элемента HVL-105/O. Была разработана схема питания, при которой эффективность преобразования системы на рабочем участке составила 90 %. Необходимая емкость внешнего аккумулятора для автономной работы системы в течение 7 дней составила 118 А·ч. Моделирование в среде MatLab продемонстрировало высокую эффективность разработанной системы.

Авторский вклад

Ламкин Иван Анатольевич – руководство научной работой; планирование, моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи.

Дегтерев Александр Эдуардович – моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи; анализ литературы.

Михайлов Иван Игоревич – моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи; анализ литературы.

Романович Мария Михайловна – моделирование и расчет теоретической модели; редактирование статьи.

Патоков Никита Олегович – анализ литературы.

Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи и руководство научными исследованиями.

Все авторы участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Author's contribution

Ivan A. Lamkin, scientific work management; planning, modeling and calculation of a theoretical model; article editing.

Alexander E. Degterev, modeling and calculation of the theoretical model; editing the article; literature analysis.

Ivan I. Mikhailov, modeling and calculation of the theoretical model; editing the article; analysis of the literature.

Maria M. Romanovich, modeling and calculation of the theoretical model; editing the article.

Nikita O. Patokov, literature analysis.

Sergey A. Tarasov, problem setting and scientific research management.

All authors participated in the discussion of the results and in the preparation of the article.

Список литературы

1. Modeling of solar batteries operating modes / S. K. Sheryazov, Y. A. Nikishin, M. V. Schelybaev, A. S. Chigak, A. K. Doskenov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 949. P. 012088. doi:10.1088/1755-1315/949/1/012088

2. Górecki K., Dąbrowski J., Krac E. Modeling Solar Cells Operating at Waste Light // Energies. 2021. Vol. 14 (10). P. 2871. doi: 10.3390/en14102871

3. Исследование влияния угла падения светового воздействия на точность координатных измерений в линейном фоточувствительном приборе с переносом заряда для систем ориентации на Солнце / А. Э. Дегтерев, У. А. Кузьмина, И. А. Ламкин, И. И. Михайлов, М. М. Романович, С. А. Тарасов // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2020. № 10. С. 12–19.

4. Energy-Efficient Modernization of the Nobel's Mansion in Saint Petersburg: Solar Energy Supply Potential / E. Aronova, Ž. Radovanović, V. Murgul, N. Vatin, M. Shvarts // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725–726. P. 1505–1511. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.1505

5. Мургул В. А. Повышение энергоэффективности реконструируемых жилых зданий исторической застройки Санкт-Петербурга // Архитектон: изв.

вузов. 2012. Т. 4, вып. 40. С. 54–62.

6. Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems / A. Smets, K. Jager, O. Isabella, R. Swaaij, M. Zeman. Cambridge: UIT, 2016. 484 p.

7. Mammano R. Switching power supply topology: voltage mode vs. current mode // Texas Instruments Incorporated. 1999. Dallas, TX, Unirode Design Note DN-62.

8. Mack R. Basic switching circuits. power sources and supplies / ed. by M. Brown. Netherlands: Elsevier, 2008. P. 13–28. doi: 10.1016/B978-0-7506-8626-6.00002-8

9. Hart D. W. Power electronics. NY: McGraw Hill, 2010. 496 p.

10. Al-Hanahi B. Y., Akin B. MPPT controlled battery charger design and simulation // Majlesi J. of Mechatronic Systems. 2017. Vol. 6, no. 3. P. 7–14.

11. Деменко Т. А., Финенко А. А. Аппаратная реализация алгоритмов для систем управления солнечными батареями // Вестн. МГТУ. 2015. № 2. С. 20–29.

12. Малинин Г. В., Серебрянников А. В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестн. Чувашского ун-та. 2016. № 3. С. 76–93.

13. Русскин В. А., Семенов С. М., Диксон Р. К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной

мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Изв. Томск. Политех. ун-та. 2016. Т. 327, № 4. С. 78–87.

14. Reliability modeling of renewable energy sources with energy storage devices / V. Mahajan, S. Mudgal, A. K. Yadav, V. Prajapati // Energy Storage in Energy Markets. NY: Academic Press, 2021. P. 317–368. doi: 10.1016/b978-0-12-820095-7.00003-0

15. Дизайн и стабилизация мощности фотоэлектрической системы с помощью matlab simulink / Х. А. Исса, Л. М. Абдали, К. А. Али, Б. А. Якимович, М. Н. Аль-Малики // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021, Севастополь, 20–23 сент. 2021/ СевГУ. Севастополь, 2021. С. 281–288.

Информация об авторах

Ламкин Иван Анатольевич – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ialamkin@etu.ru

Дегтерев Александр Эдуардович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2020), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 16 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aedegterev@etu.ru

Михайлов Иван Игоревич – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2013), ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; органические светодиоды; коллоидные квантовые точки. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: iimihalov@gmail.com

Романович Мария Михайловна – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), аспирант 2-го года обучения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агрофотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: mmromanovich@etu.ru

Патоков Никита Олегович – исследователь, преподаватель-исследователь по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии" (2021) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; микроэлектроника; фотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: patocov@mail.ru

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: satarasov@etu.ru

References

1. Sheryazov S. K., Nikishin Y. A., Schelybaev M. V., Chigak A. S., Doskenov A. K. Modeling of Solar Batteries Operating Modes. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 949, p. 012088. doi:10.1088/1755-1315/949/1/012088

2. Górecki K., Dąbrowski J., Krac E. Modeling Solar Cells Operating at Waste Light. Energies. 2021, vol. 14 (10), p. 2871. doi: 10.3390/en14102871

3. Degterev A. E., Kuzmina U. A., Lamkin I. A., Mikhailov I. I., Romanovich M. M., Tarasov S. A. Study of the Angle Influence of the Incidence Light Impact on the Accuracy of Coordinate Measurements in a Linear Photosensitive Device with Charge Transfer for Orientation Systems on the Sun. Izvestia SPbETU "LETI". 2020, vol. 10, pp. 12–19. (In Russ.)

4. Aronova E., Radovanović Ž., Murgul V., Vatin N., Shvarts M. Energy-Efficient Modernization of the Nobel's Mansion in Saint Petersburg: Solar Energy Supply Potential. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 725–726, pp. 1505–1511. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.1505

5. Murgul V. A. Increasing the energy efficiency of residential buildings in the historical area of St Petersburg. *Architecton: Proc. of Higher Education*. 2012, vol. 4 (40), pp. 54–62. (In Russ.)

6. Smets A., Jager K., Isabella O., Swaaij R., Zeman M. *Solar Energy: the Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. Cambridge, UIT, 2016, 484 p.

7. Mammano R. *Switching Power Supply Topology: Voltage Mode vs. Current Mode*. Texas Instruments Incorporated. 1999. Dallas, TX, Unitrode Design Note DN-62.

8. Mack R. *Basic Switching Circuits. Power Sources and Supplies*. Ed. by M. Brown. Netherlands, Elsevier, 2008, pp. 13–28. doi: 10.1016/B978-0-7506-8626-6.00002-8

9. Hart D. W. *Power Electronics*. NY, McGraw Hill, 2010, 496 p.

10. Al-Hanahi B. Y., Akin B. MPPT Controlled Battery Charger Design And Simulation. *Majlesi J. of Mechatronic Systems*. 2017, vol. 6, no. 3, pp. 7–14.

11. Demenko T. A., Finenko A. A. Hardware Implementation of Algorithms for Solar Panels Control Systems. *Bulletin of MSTU*. 2015, no. 20, pp. 20–29. (In Russ.)

12. Malinin G. V., Serebryannikov A. V. Maximum Power Point Tracking for PV Array // *Bulletin of the Chuvash University*. 2016, no. 3, pp. 76–93. (In Russ.)

13. Russkin V. A., Semenov S. M., Dixon R. C. Study of Algorithms for Tracking Maximum Power Point for Boost Dc-Dc Converter of Solar Inverter // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2016, vol. 327, no. 4, pp. 78–87. (In Russ.)

14. Mahajan V., Mudgal S., Yadav A. K., Prapapati V. Reliability Modeling of Renewable Energy Sources with Energy Storage Devices. *Energy Storage in Energy Markets*. NY, Academic Press, 2021, pp. 317–368. doi: 10.1016/b978-0-12-820095-7.00003-0

15. Issa Kh. A., Abdali L. M., Ali K. A., Yakimovich B. A., Al-Maliki M. N. Design and Power Constancy of a Photovoltaic System by Using MATLAB Simulink. *Ecological, industrial and energy safety – 2021, Sevastopol, 20–23 Sept. 2021. Sevastopol, SevGU, 2021, pp. 281–288. (In Russ.)*

Information about the authors

Ivan A. Lamkin, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor at the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ialamkin@etu.ru

Alexander E. Degterev, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aedegterev@etu.ru

Ivan I. Mikhailov, Master in Electronics and Nanoelectronics (2013), assistant of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy; organic light-emitting diodes; colloidal quantum dots.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: iimihalov@gmail.com

Maria M. Romanovich, Master in "Electronics and Nanoelectronics" (2020), 2nd year Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; agrophotonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: mmmromanovich@etu.ru

Nikita O. Patokov – Researcher, teacher-researcher in the field of "Photonics, instrumentation, optical and bio-technical systems and technologies" (2021) Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: electronics; microelectronics; photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: patocov@mail.ru

Sergey A. Tarasov, Dr Sci. (Eng.) (2019), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: interests: electronics; photonics; solar energy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: satarasov@etu.ru