



Исследование и разработка системы автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения технических средств охраны

© М.А. Миронов, С.А. Козлов

АО «Научно-производственный комплекс «Дедал», г. Дубна, Россия

Резюме: Целью работы является разработка методики для проектирования системы автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения технических средств охраны. Объектом исследования является система автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей. Приведены накопители энергии, получившие широкое распространение при проектировании систем электропитания для электроснабжения технических средств охраны. Использована методика проектирования системы электропитания, в которой учтено интегральное влияние солнечной инсоляции, температуры окружающей среды в диапазоне от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$, фотоэлектрического модуля и аккумуляторной батареи; мощности фотоэлектрического модуля; требований автономности работы технических средств охраны; электрических характеристик солнечного контроллера заряда (номинального напряжения холостого хода и номинального тока заряда). Для расчета суммарной солнечной инсоляции, приходящейся на поверхность фотоэлектрического модуля, использована модель Кастрова для расчета прямого солнечного излучения, модель Берлаге для расчета рассеянной солнечной энергии и модель Берлянда для расчета инсоляции в условиях облачности. Проведены исследования литий-титанатных аккумуляторных батарей в климатической камере и разработана соответствующая математическая модель зависимости емкости аккумуляторной батареи от температуры. Для определения солнечной инсоляции, падающей на наклонную поверхность фотоэлектрического модуля, разработано программное обеспечение на языке программирования C#. Спроектированная система электропитания на основе фотоэлектрического модуля обеспечивает автономное бесперебойное непрерывное электропитание аппаратуры при постоянном потреблении техническими средствами охраны не более $115,2 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ в сутки. Результаты работы могут быть использованы при разработке системы автономного электропитания для электроснабжения технических средств охраны, безопасности, контроля.

Ключевые слова: система автономного электропитания, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрический модуль, аккумуляторные батареи, технические средства охраны

Для цитирования: Миронов М.А., Козлов С.А. Исследование и разработка системы автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения технических средств охраны. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1243–1254. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1243-1254>

Research and development of a PV converter-based stand-alone power supply system for technical security equipment power supply

Mikhail A. Mironov, Sergei A. Kozlov

Dedal Joint Stock Company, Dubna, Russia

Abstract: The purpose of the work is to develop a methodology for designing a stand-alone power supply system based on photovoltaic (PV) converters for technical security equipment power supply. The object of the study is a PV converter-based stand-alone power supply system. Energy storage units, which are widely used in the designing of power supply systems for power supply of technical security equipment are presented. A methodology for designing a power supply system is used, which takes into account the integral effect of solar insolation, ambient temperature in the range from -40°C to $+50^{\circ}\text{C}$, temperature of a PV module and a storage battery; PV module capacity; requirements for independent operation of technical security equipment; electrical characteristics of the solar charge controller (rated open-circuit voltage and rated charge current). To calculate the total solar insolation arriving at the surface of a photovoltaic module, the Kastrov model is used for calculating direct solar radiation; the Berlage model is used for calculating the scattered solar energy and the Berland model is used for calculating insolation in cloudy conditions. The studies of lithium-titanate stor-

age batteries have been carried out in the climate chamber and a corresponding mathematical model has been developed for the temperature-dependent capacity of the battery. To determine solar insolation falling on the tilted surface of the PV module the software has been developed in the C# programming language. The designed PV module-based power supply system provides an independent uninterrupted continuous power supply of equipment under constant consumption of no more than 115.2 Wh per day by technical security equipment. The results of the work can be used in the development of a stand-alone power supply system for power supply of technical security equipment, security and control.

Keywords: stand-alone power supply system, renewable energy sources, photovoltaic (PV) module, (storage) batteries, technical security equipment

For citation: Mironov MA, Kozlov SA. Research and development of a PV converter-based stand-alone power supply system for technical security equipment power supply. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1243–1254. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1243-1254>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания относительно компактного автономного источника электропитания с выходной электрической мощностью от мВт до нескольких кВт, для электроснабжения электронной аппаратуры технических средств охраны (ТСО) является достаточно актуальной. Потребность в таких источниках электропитания исчисляется множеством устройств. Это, например, автономные системы телевизионного наблюдения, периметровые и объектовые средства обнаружения нарушителей, радиолокационные станции, средства контроля доступа и управления, системы сбора и обработки данных и т.д.

Основными источниками электроэнергии для автономных потребителей являются дизель-генераторные установки (ДГУ), что обусловлено многими причинами [1, 2]. ДГУ обладает следующим рядом значительных преимуществ [3]:

- универсальность применения;
- низкая стоимость оборудования;
- достаточная надежность и долговечность;
- дизельное топливо используется в широком диапазоне рабочих температур от -50 до +50°C.

Недостатки дизель-генераторных установок в составе системы автономного электропитания проявляются при работе на нагрузку, отличную от номинальной, когда происходит повышение удельного расхода топлива, масла и воздуха, что приводит к повышенному

износу узлов и деталей ДГУ [4]. Немаловажным является негативный экологический фактор использования дизель-генераторных установок; за последнее время остроту приобрели проблемы нефтегазового загрязнения территорий, а также вывоза миллионов бочек из-под горюче-смазочных материалов [5].

Одним из альтернативных решений данной проблемы может быть применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в качестве источника генерации. В настоящее время во всем мире наблюдается тенденция к росту использования возобновляемых источников энергии для электропитания территориально распределенных и удаленных объектов инфраструктуры [6–8]. По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, прирост мощности систем автономного электропитания (САЭ) на основе фотоэлектрической энергии с 2010 по 2019 год составил в среднем 28%¹. График прироста мощности приведен на рис. 1.

ТИПОВАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Солнечная энергия занимает особое место среди всех возобновляемых видов энергии. Практическое применение источника электрической энергии на основе фотоэлектрических модулей (ФМ) дает возможность создать систему практически любой сложности, не зависящую от сети централизованного электроснабжения. Вместе с тем известно,

¹Renewable capacity statistics 2020 // International Renewable Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf (15.07.2020).



что одной из основных проблем возобновляемой энергетики является непостоянство выработки (волатильность) электроэнергии генерирующей установкой. Надежность системы автономного электропитания может быть повышена путем добавления в систему накопителя энергии [9, 10]. Широкое распространение в САЭ получили следующие накопители энергии [11, 12]:

- герметичные необслуживаемые свинцово-кислотные (GEL, OPzS, OPzV, AGM);
- литий-ионные (Li-ion);
- литий-железно-фосфатные (LiFePO_4 , LFP);
- литий-титанатные ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO).

Выбор типа аккумуляторной батареи (АКБ) для системы автономного электропитания зависит от условий эксплуатации изделия (Крайний Север, тропики, умеренный климат), необходимого числа циклов заряда/разряда, требований автономности, срока службы и т.д.² На рис. 2 представлена зависимость типа аккумуляторной батареи от числа рабочих циклов заряда/разряда при глубине разряда 80%.

Одним из перспективных накопителей энергии является литий-титанатная аккумуляторная батарея ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO), которая

обеспечивает более 40000 циклов заряда/разряда при сохранении 80% от емкости батареи³. Однако внедрение в системы автономного электропитания данных накопителей энергии происходит медленно ввиду их пока высокой стоимости.

САЭ, помимо фотоэлектрических модулей и аккумуляторных батарей, является типичной, содержит контроллер заряда АКБ и устройство защиты АКБ, предназначенных для преобразования напряжения фотоэлектрических модулей в напряжение заряда аккумуляторных батарей и ее защиты от глубокого разряда, соответственно. Типовая структурная схема системы автономного электропитания приведена на рис. 3.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Рассмотрим основные этапы методики проектирования САЭ на основе фотоэлектрических модулей для электроснабжения ТСО.

1. Расчет потребления мощности электроприборами ТСО за сутки производится по следующему выражению:

$$P_{\text{сумм.сут.}} = \sum 24P_n, \quad (1)$$

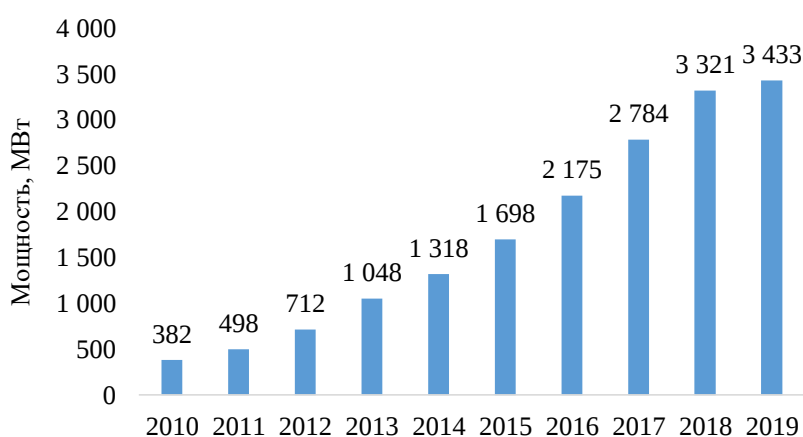


Рис. 1. Прирост мощности систем автономного электропитания на основе фотоэлектрических модулей в мире
Fig. 1. Capacity gain of PV module-based stand-alone power supply systems in the world

²ГОСТ Р МЭК 61427-1-2014. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи для возобновляемых источников энергии. Общие требования и методы испытаний. Часть 1. Применение в автономных фотоэлектрических энергетических системах. Введ. 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 27 с.

³Product lineup // TOSHIBA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scib.jp/en/product/cell.htm> (20.07.2020).

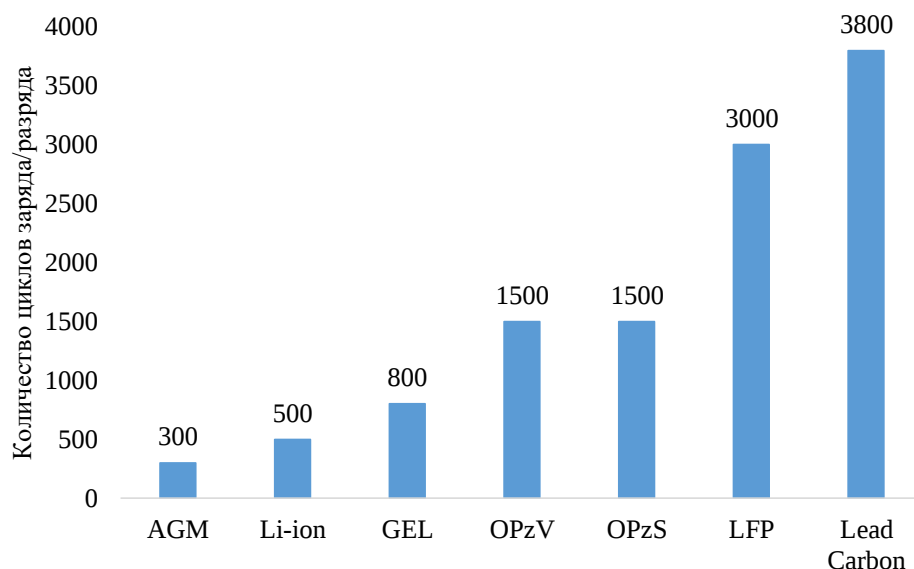


Рис. 2. Зависимость типа аккумуляторной батареи от количества циклов заряда/разряда
 Fig. 2. Battery type vs number of charge/discharge cycles

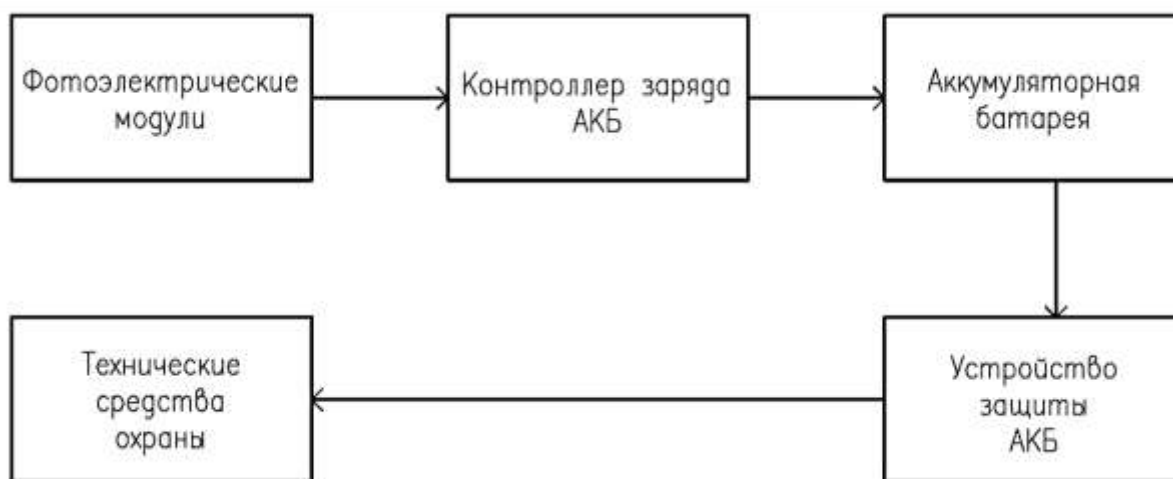


Рис. 3. Типовая структурная схема системы автономного электропитания
 Fig. 3. Typical block diagram of a stand-alone power supply system

где $P_{\text{сумм.сут.}}$ – суммарное потребление мощности электроприборами ТСО за сутки, Вт·ч; P_n – номинальная мощность ТСО, Вт.

2. Расчет емкости аккумуляторной батареи производится исходя из требований автономной работы ТСО (только за счет запасенной в АКБ энергии) и глубины разряда аккумуляторной батареи:

$$C_{аб} \geq \frac{P_{\text{сумм.сут.}} \cdot t_a}{U_{аб} \cdot K_T \cdot K_\Gamma}, \quad (2)$$

где $C_{аб}$ – емкость аккумуляторной батареи, Ач; t_a – время автономной работы ТСО, сут; $U_{аб}$ – напряжение аккумуляторной батареи, В; K_T – коэффициент зависимости емкости аккумуляторной батареи от температуры; K_Γ – глубина разряда аккумуляторной батареи.

Напряжение аккумуляторной батареи определяется по данным технической спецификации.

В настоящей работе для определения коэффициента зависимости емкости АКБ от



температуры проведены испытания литий-титанатной аккумуляторной батареи в климатической камере (тепла и холода). В результате обработки экспериментальных данных определена аппроксимирующая зависимость коэффициента K_T литий-титанатной АКБ (ячейки SCiB) от температуры (в диапазоне от -40°C до $+50^\circ\text{C}$):

$$K_T = 0,9011 + 0,0048 \cdot T_{АКБ} - 2 \cdot 10^{-5} \cdot T_{АКБ}^2 - 4 \cdot 10^{-7} \cdot T_{АКБ}^3, \quad (3)$$

где $T_{АКБ}$ – температура аккумуляторной батареи, $^\circ\text{C}$.

3. Расчет необходимой мощности фотоэлектрических модулей:

$$P_{см} \geq \frac{P_{сумм.сут.} \cdot W_{сн}}{W_{инс} \cdot \eta_{конт} \times \left[1 + \frac{k_p (\bar{T} + \Delta T_{фм} - T_{СУИ})}{100\%} \right]}, \quad (4)$$

где $P_{см}$ – мощность фотоэлектрических модулей, необходимая для бесперебойной работы ТСО, Вт; $W_{сн}$ – солнечная постоянная при АМ 1,5, Вт/м^2 ; $W_{инс}$ – среднемесячная инсоляция, падающая на поверхность ФМ, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{ч}$ в сут; $\eta_{конт}$ – КПД контроллера заряда аккумуляторной батареи; k_p – температурный коэффициент $P_{тпр}$, $\%/^\circ\text{C}$; $\bar{T}$ – среднемесячная температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; $\Delta T_{фм}$ – изменение температуры поверхности ФМ, $^\circ\text{C}$; $T_{СУИ}$ – температура при стандартных условиях испытания ФМ, $^\circ\text{C}$.

КПД контроллера заряда АКБ и температурный коэффициент $P_{тпр}$ определяются по данным технических спецификаций оборудования.

Изменения температуры поверхности ФМ $\Delta T_{фм}$ рассчитывается по модели, предложенной С.Г. Обуховым, И.А. Плотниковым [13]:

$$\Delta T_{фм} = 0,0283 \cdot W_{инс} - 0,0058 \cdot W_{инс} \times V + 0,0005 \cdot W_{инс} \cdot V^2, \quad (5)$$

где V – среднемесячная скорость ветра в месте установки САЭ, м/с.

Примечание. При круглогодичной эксплуатации системы автономного электропитания показатели: $W_{инс}$, V , $\Delta T_{фм}$, $\bar{T}$ определяются для того месяца, в котором наблюдалась наименьшая среднемесячная солнечная инсоляция за год.

Получение модели солнечной инсоляции, применяемой для расчета необходимой мощности ФМ для обеспечения электропитания нагрузки САЭ, является актуальной задачей. Исследованиям в данной области посвящены многие работы [14–19].

Для определения среднемесячной солнечной инсоляции, падающей на поверхность фотоэлектрического модуля $W_{инс}$, воспользуемся выражением:

$$W_{инс} = \sum_{n=1}^n W_n, \quad (6)$$

где W_n – солнечная инсоляция за сутки, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{ч}$; n – порядковый номер дня месяца, в котором наблюдалась наименьшая среднемесячная солнечная инсоляция за год.

Солнечная инсоляция за сутки определяется как

$$W_n = \frac{12}{\pi} \cdot (10^{-3}) \cdot \int_{\omega_k}^{\omega_n} Q_{накл} d\omega, \quad (7)$$

где $Q_{накл}$ – суммарная солнечная инсоляция, падающая на наклонную плоскость фотоэлектрического модуля, Вт/м^2 ; ω_n и ω_k – часовые углы Солнца, соответствующие моментам времени восхода и заката.

Суммарная солнечная инсоляция, падающая на наклонную плоскость фотоэлектрического модуля, вычисляется по формуле⁴:

⁴Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособ. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 128 с.

$$Q_{\text{накл}} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рас}} + Q_{\text{отр}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – прямое солнечное излучение, поступающее на наклонную поверхность ФМ, Вт/м²; $Q_{\text{рас}}$ – рассеянная солнечная инсоляция, падающая на наклонную плоскость ФМ, Вт/м²; $Q_{\text{отр}}$ – излучение, отраженное от поверхности земли и поступающее на поверхность ФМ, Вт/м².

Первое слагаемое в выражении (8) определяется с использованием формулы Кастрова:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{отм}} \cdot \cos \theta = \frac{Q_0 \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha + c} \cdot \cos \theta, \quad (9)$$

где $Q_{\text{отм}}$ – прямое солнечное излучение, поступающее на ортогональную солнечным лучам поверхность ФМ, Вт/м²; θ – угол падения прямого солнечного излучения на плоскость фотоэлектрического модуля, рад; Q_0 – солнечная постоянная при AM0, 1370 Вт/м²; α – высота Солнца, рад; c – величина степени прозрачности атмосферы.

Для определения угла падения прямого солнечного излучения на поверхность ФМ используется выражение⁵:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \cos s \cdot (\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \sin s \cdot \cos \gamma \times \\ & \times \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega) + \cos \delta \cdot \sin s \times \\ & \times (\sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \sin \gamma \cdot \sin \omega), \end{aligned} \quad (10)$$

где δ – склонение Солнца, рад; φ – географическая широта расположения поверхности ФМ, рад; s – угол наклона ФМ к горизонту, рад; γ – азимут ФМ, рад; ω – часовой угол Солнца, рад.

Склонение Солнца находится по формуле:

$$\delta = \arcsin \{ \sin \beta \cdot \cos \varepsilon + \cos \beta \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \lambda \}, \quad (11)$$

где β – широта Солнца ($\beta = 0$); ε – наклон эклиптики; λ – долгота Солнца.

Значение среднего наклона эклиптики к экватору задается формулой:

$$\varepsilon = 23^\circ 27' 08,26'' - 46,845'' T - 0,00059'' T^2 + 0,001811'' T^3, \quad (12)$$

где T – число юлианских веков, прошедших с эпохи 5 января 1900 г.

Высоту Солнца можно найти из решения выражения⁶:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega. \quad (13)$$

Рассеянную солнечную инсоляцию $Q_{\text{рас}}$, падающую на наклонную плоскость ФМ, определяем по выражению:

$$\begin{aligned} Q_{\text{рас}} = & Q_{\text{рас_гор}} \times \\ & \times [0,55 + 0,434 \cdot \cos \theta + 0,313 \cdot (\cos \theta)^2], \end{aligned} \quad (14)$$

где $Q_{\text{рас_гор}}$ – поток рассеянной солнечной энергии, поступающий на горизонтальную поверхность ФМ, Вт/м². Его можно вычислить по формуле Берлаге [19]:

$$Q_{\text{рас_гор}} = \frac{1}{3} \cdot (Q_0 - Q_{\text{отм}}) \cdot \sin \alpha. \quad (15)$$

Отраженное от поверхности Земли излучение $Q_{\text{отр}}$, поступающее на наклонно установленную плоскость ФМ, учитываемое в выражении (8) для суммарной солнечной инсоляции, относительно мало и в первом приближении его не учитываем.

Выражение для расчета солнечной инсоляции, падающей на плоскость ФМ в условиях облачности, запишется в виде⁷:

$$Q_{\text{накл}} = (Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рас}}) \times [1 - (a + b \cdot n) \cdot n], \quad (16)$$

⁵Duffie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of thermal processes. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 928 p.

⁶Duffett-Smith P., Zwart J. Practical Astronomy with your Calculator or Spreadsheet. New York: Cambridge University Press, 2011. 238 p.

⁷Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 229 с.



где a – коэффициент, зависящий от широты местности установки ФМ в составе системы автономного электропитания (см. табл. 1); $b \approx 0,38$ – коэффициент, который при всех условиях оказывается примерно одинаковым; n – количество облаков ($n = 0$ при отсутствии облаков, $n = 1$ при сплошной облачности).

На основе вышеприведенных соотношений (6)–(16) для определения среднемесячной солнечной инсоляции, падающей на поверхность ФМ, разработано программное обеспечение на языке программирования C#, представленное на рис. 4.

Сравнивая полученные результаты с данными по солнечной инсоляции проекта NASA «Prediction Of Worldwide Energy Resources»⁸, выявлена приемлемая погрешность расчета.

Проведенные расчеты показали, что математическая модель поступления солнечной инсоляции на наклонную плоскость ФМ адекватна. Средняя относительная погрешность

модели относительно данных проекта NASA не превышает 11%, что вполне пригодно для проведения инженерных расчетов.

4. Расчет основных параметров солнечного контроллера заряда с функцией поиска точки максимальной мощности.

Номинальный ток заряда рассчитывается по формуле:

$$I_{з.аб} \geq \frac{P_{см}}{U_{аб}}, \quad (17)$$

где $I_{з.аб}$ – зарядный ток аккумуляторной батареи, А.

Номинальное напряжение холостого хода выбирается исходя из характеристик и способа соединения фотоэлектрических модулей:

$$U_{хх.кз} \geq U_{хх}, \quad (18)$$

Таблица 1. Зависимость коэффициента « a » от широты расположения систем автономного электропитания
Table 1. Coefficient « a » vs location latitude of a stand-alone power supply system

ϕ	0	10	20	30	40	50	60	70	75	80	85
a	0,38	0,4	0,37	0,36	0,38	0,4	0,36	0,18	0,16	0,15	0,14

День: 15
 Месяц: 5
 Год: 2020
 Широта: 56,733
 Долгота: 37,166
 GMT: 3
 Угол наклона: 90
 Азимут панели: 0
 Облачность: 0
 Рассчитать
 Время восхода: 4,28684494118543
 Время заката: 20,6753778906493
 Суммарная инсоляция: 2,27577325329343

Рис. 4. Программное обеспечение для расчета солнечной инсоляции, падающей на фотоэлектрические модули
Fig. 4. Software for calculating solar insolation falling on PV modules

⁸NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources [Электронный ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov> (20.07.2020).

где $U_{ок.кз}$ – номинальное напряжение холостого хода контроллера заряда, В; $U_{ос}$ – напряжение холостого хода фотоэлектрического массива, В.

На базе разработанной методики спроектирована САЭ на основе возобновляемого источника энергии в виде фотоэлектрического модуля (рис. 5) для электроснабжения технических средств охраны, в течение года САЭ обеспечивает круглосуточное бесперебойное питание аппаратуры ТСО, при потреблении не более 115,2 Вт·ч в сутки.

Для эксплуатации и проведения предварительных испытаний был выбран полигон «Альтернативная энергетика» в г. Дубна Московской области, входящий в инновационно-промышленный кластер «Возобновляемые источники энергии», находящийся по следующим координатам: 56.730821° N, 37.118088° E.

В качестве электрической нагрузки в САЭ используются ТСО: вибрационное средство обнаружения «Дельфин-М»⁹, предназначенное для охраны периметра полигона «Альтернативная энергетика», и 4 радиоволновых

объемных извещателя «Агат-СП-5У/1»¹⁰, предназначенных для обнаружения посторонних лиц на территории объекта; общее суточное потребление ТСО составляет 115,2 Вт·ч или мощность потребления 4,8 Вт.

Исходя из методики, представленной в выражениях (1)–(18), подобрано следующее оборудование:

1) литий-титанатная АКБ с формулой 6s3p с использованием ячейки Toshiba (23 Ач 2,3 В);

2) гетероструктурный фотоэлектрический модуль HVL119, обеспечивающий лучшие характеристики в условиях частичной и сплошной облачности в Московской области;

3) солнечный контроллер заряда Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15, обеспечивающий программируемые параметры заряда-разряда литий-титанатного АКБ: напряжение стадии Bulk, напряжение стадии Absorption, напряжение стадии Float, время стадии Absorption, ток заряда аккумулятора, напряжение отключения нагрузки аккумулятора, температурную компенсацию.



Рис. 5. Система автономного электропитания для электроснабжения технических средств охраны
Fig. 5. Stand-alone power supply system for security equipment power supply

⁹Периметровые и объектовые средства обнаружения [Электронный ресурс]. URL: <https://dedal.ru/projects/vibratsionnye/delfin-m.html> (16.07.2020).

¹⁰Однопозиционные объемные извещатели [Электронный ресурс]. URL: <https://umirs.ru/catalog/one-position-radio-signals/agat-sp5u-1/> (16.07.2020).



Таблица 2. Технические характеристики систем автономного электропитания
Table 2. Technical specifications of stand-alone power supply systems

Характеристики	Значение
Номинальная нагрузка, Вт	4,8
Максимальная кратковременная нагрузка, Вт	200
Емкость аккумуляторной батареи, Ач	69
Номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В	13,8
Время автономной работы от аккумуляторной батареи, сут	не менее 6
Номинальная мощность фотоэлектрического модуля, Вт	119,6
Напряжение точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля, В	28,9
Ток точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля, А	4,14
КПД ячейки фотоэлектрического модуля, %	23,5
Номинальный ток заряда солнечного контроллера заряда, А	15
Максимальное напряжение солнечного контроллера заряда, В	75
Алгоритм заряда солнечного контроллера заряда	Трехстадийный
Рабочая температуры, °С	-40 до +50

Технические характеристики спроектированной САЭ для электроснабжения ТСО сведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проектирование энергоэффективных автономных систем электропитания на основе фотоэлектрических модулей для электроснабжения технических средств охраны является актуальным. Показаны тенденции роста ВИЭ в системах электропитания для автономных потребителей.

2. Разработана методика проектирования САЭ, в которой учтено интегральное влияние солнечной инсоляции, температуры окружающей среды в диапазоне от -40 °С до +50 °С, фотоэлектрического модуля и аккумуляторной батареи; мощности фотоэлектрического модуля; требований автономности работы технических средств охраны; электрических характеристик солнечного контроллера заряда (номинального напряжения холостого хо-

да и номинального тока заряда).

3. Получена аппроксимирующая модель зависимости емкости литий-титанатной аккумуляторной батареи от температуры. На основе полученной модели солнечной инсоляции с использованием модели Кастрова для расчета прямого солнечного излучения, модели Берлаге для расчета рассеянной солнечной энергии и модели Берлянда для расчета инсоляции в условиях облачности, разработано программное обеспечение на языке программирования C#.

4. Спроектирована система электропитания на основе фотоэлектрического модуля, которая обеспечивает автономное бесперебойное электропитание аппаратуры при постоянном суточном потреблении ТСО не более 115,2 Вт·ч. Адекватность методики расчета подтверждена продолжительными натурными испытаниями реальной САЭ на экспериментальном полигоне.

Список литературы

1. Обухов С.Г., Плотников И.А. Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 6. С. 95–102.
2. Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Ербаев Е.Т., Тулепова Г.Н., Жексембиева Н.С. Гибридная система электроснабжения с объединенным звеном постоянного тока // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3. С. 96–100.
3. Волохов Н.А., Рындин И.А., Космынина Н.М. анализ и оценка эффективности использования различных источников электроэнергии в условиях Арктики // Творчество – шаг в успешное будущее. Арктика и ее основание: матер. IX Всерос. науч. молодеж. конф.

с междунар. участием с элементами науч. шк. им. проф. М.К. Коровина. 2016. Томск. С. 283–285.
4. Абсалямов Д.Р., Аитов Р.Н., Марченко М.А. Повышение энергоэффективности при эксплуатации системы электроснабжения наземных комплексов космического назначения путем применения дизель-генераторных установок с переменной частотой вращения // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2017. № 658. С. 85–92.
5. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2. С. 18–27.
6. Amoah A., Kwablah E., Korle K., Offei D. Renewable energy consumption in Africa: the role of economic well-

being and economic freedom // *Energy, Sustainability and Society*. 2020. Vol. 10.
<https://doi.org/10.1186/s13705-020-00264-3>

7. Arndt C., Hartley F., Ireland G., Mahrt K., Merven B., Wright J. Developments in variable renewable energy and implications for developing countries // *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. 2018. Vol. 5. P. 240–246.
<https://doi.org/10.1007/s40518-018-0121-9>

8. Mitrova T., Melnikov Yu. Energy transition in Russia // *Energy Transitions*. 2019. Vol. 3. P. 73–80.
<https://doi.org/10.1007/s41825-019-00016-8>

9. Годин П.А., Годин М.А. Децентрализованное энергоснабжение объектов малой энергоемкости на основе гибридной энергоустановки с системой аккумулирования энергии // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2013. № 30. С. 241–246.

10. Ben Elghali S., Outbib R., Benbouzid M. Selecting and optimal sizing of hybridized energy storage systems for tidal energy integration into power grid // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2019. Vol. 7. P. 113–122. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0442-0>

11. Агафонов Д.В., Эрк А.Ф. Выбор химического источника тока для буферной батареи возобновляемых источников энергии // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 95. С. 26–33.
<https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10028>

12. Yao Liangzhong, Yang Bo, Cui Hongfen, Zhuang Jun, Ye Jilei, Xue Jinhua. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016. Vol. 4. Issue 4. P. 519–528.
<https://doi.org/10.1007/s40565-016-0248-x>

13. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 6. С. 38–51.

14. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки солнечного излучения для фотоэлектрической станции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 5. С. 49–55.

15. Costa Rocha P.A., Fernandes J.L., Modolo A.B., Pontes Lima R.J., Vieira da Silva M.E., Dias Bezerra C.A. Estimation of daily, weekly and monthly global solar radiation using ANNs and a long data set: a case study of Fortaleza, in Brazilian Northeast region // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2019. Vol. 10. P. 319–334.
<https://doi.org/10.1007/s40095-019-0313-0>

16. Sarkar M.N.I., Sifat A.I. Global solar radiation estimation from commonly available meteorological data for Bangladesh // *Renewables: Wind, Water, and Solar volume*. 2016. Vol. 3.
<https://doi.org/10.1186/s40807-016-0027-3>

17. Ng Khai Mun, Adam N.M., Inayatullah O., Ab Kadir M.Z.A. Assessment of solar radiation on diversely oriented surfaces and optimum tilts for solar absorbers in Malaysian tropical latitude // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2014. Vol. 5.
<https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>

18. Mirmasoudi S., Byrne J., Kroebe R., Johnson D., MacDonald R. A novel time-effective model for daily distributed solar radiation estimates across variable terrain // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2018. Vol. 9. P. 383–398.
<https://doi.org/10.1007/s40095-018-0279-3>

19. Бузунов А.С., Черных А.Г. Методика теоретического расчета возможных сумм солнечной радиации // *Актуальные вопросы аграрной науки*. 2015. № 17. С. 33–39.

20. Шакиров В.А. Методика оценки прихода суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием многолетних архивов метеорологических данных // *Системы. Методы. Технологии*. 2017. № 4. С. 115–121.
<https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-115-121>

References

1. Obukhov SG, Plotnikov IA. The experimental researches of diesel generator set on variable speed. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015;326(6):95–102. (In Russ.)

2. Artyukhov II, Stepanov SF, Erbaev ET, Tulepova GN, Zhexembiyeva NS. Hybrid power supply system with a combined DC link. *Voprosy elektrotekhnologii = Journal of Electrotechnics*. 2015;3:96–100. (In Russ.)

3. Volokhov NA, Ryndin IA, Kosmynina NM. Analysis and evaluation of application efficiency of various energy sources in the Arctic. In: *Tvorchestvo – shag v uspešnoe budushchee. Artika i ee osnovanie: materialy IX Vserossiiskoi nauchnoi molodezhnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem s elementami nauchnoi shkoly imeni professora M.K. Korovina = Creativity as a step into a suc-*

cessful future. The Arctic and its foundation: proceedings of IX All-Russian scientific youth conference with international participation with the elements of the scientific school named after the Professor M.K. Korovin. Tomsk; 2016, p. 283–285. (In Russ.)

4. Absalyamov DR, Aitov RN, Marchenko MA. Improving energy efficiency under operation of ground-based space complex power supply system by using variable speed diesel generator units. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*. 2017;658:85–92. (In Russ.)

5. Sokolov Yul. Arctic: problem of the accumulated environmental damage. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2013;2:8–27. (In Russ.)

6. Amoah A, Kwablah E, Korle K, Offei D. Renewable energy consumption in Africa: the role of economic well-being and economic freedom. *Energy, Sustainability and Society*. 2020;10.



<https://doi.org/10.1186/s13705-020-00264-3>

7. Arndt C, Hartley F, Ireland G, Mahrt K, Merven B, Wright J. Developments in variable renewable energy and implications for developing countries. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. 2018;5:240–246. <https://doi.org/10.1007/s40518-018-0121-9>

8. Mitrova T, Melnikov Yu. Energy transition in Russia. *Energy Transitions*. 2019;3:73–80. <https://doi.org/10.1007/s41825-019-00016-8>

9. Godin PA, Godin MA. Decentralized power supply of small power consumption objects based on hybrid power installation with energy accumulation system. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013;30:241–246. (In Russ.)

10. Ben Elghali S, Outbib R, Benbouzid M. Selecting and optimal sizing of hybridized energy storage systems for tidal energy integration into power grid. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2019;7:113–122. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0442-0>

11. Agafonov DV, Erk AF. Choice of a chemical cell for the buffer battery within renewable energy sources. *Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018;95:26–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10028>

12. Yao Liangzhong, Yang Bo, Cui Hongfen, Zhuang Jun, Ye Jilei, Xue Jinhua. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016;4(4):519–528. <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0248-x>

13. Obukhov SG, Plotnikov IA. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(6):38–51. (In Russ.)

14. Dmitrienko VN, Lukutin BV. Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(5):49–55. (In Russ.)

15. Costa Rocha PA, Fernandes JL, Modolo AB, Pontes Lima RJ, Vieira da Silva ME, Dias Bezerra CA. Estimation of daily, weekly and monthly global solar radiation using ANNs and a long data set: a case study of Fortaleza, in Brazilian Northeast region. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2019;10:319–334. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-0313-0>

16. Sarkar MNI, Sifat AI. Global solar radiation estimation from commonly available meteorological data for Bangladesh. *Renewables: Wind, Water, and Solar volume*. 2016;3. <https://doi.org/10.1186/s40807-016-0027-3>

17. Ng Khai Mun, Adam NM, Inayatullah O, Ab Kadir MZA. Assessment of solar radiation on diversely oriented surfaces and optimum tilts for solar absorbers in Malaysian tropical latitude. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2014;5. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>

18. Mirmasoudi S, Byrne J, Kroebel R, Johnson D, MacDonald R. A novel time-effective model for daily distributed solar radiation estimates across variable terrain. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2018;9:383–398. <https://doi.org/10.1007/s40095-018-0279-3>

19. Buzunov AS, Chernykh AG. Methods theoretical calculations of the likely amount of solar radiation. *Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki = Actual issues of agrarian science*. 2015;17:33–39. (In Russ.)

20. Shakirov VA. A technique for estimating global solar radiation on inclined surfaces using multi-year archives of meteorological data. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2017;4:115–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-115-121>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Миронов Михаил Анатольевич,
ведущий инженер Отдела научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ,
АО «Научно-производственный комплекс «Дедал»,
141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 20/41, Россия;
✉ e-mail: mironov_ma@dedal.ru

Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Mironov,
Leading Engineer of the Department of Research and Development Works,
Research and Production Complex Dedal JSC,
20/41, Zhelio-Kiuri, Dubna 141980, Russia;
✉ e-mail: mironov_ma@dedal.ru

Козлов Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
исполняющий обязанности генерального директора,
АО «Научно-производственный комплекс «Дедал»,
141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 20/41, Россия;
e-mail: kozlov_sa@dedal.ru

Sergei A. Kozlov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Acting Director General,
Research and Production Complex Dedal JSC,
20/41, Zholio-Kiuri, Dubna 141980, Russia;
e-mail: kozlov_sa@dedal.ru

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.10.20; одобрена после рецензирования 18.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 04.10.20; approved after reviewing on 18.11.2020; accepted for publication on 18.12.2020.