



Научная статья

УДК 620.91

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-134-146>

## Исследование влияния температуры окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки

Н.П. Местников<sup>1✉</sup>, П.Ф. Васильев<sup>2</sup>, Г.И. Давыдов<sup>3</sup>, А.М. Хоютанов<sup>4</sup>,  
А.М.-Н. Альзаккар<sup>5</sup>, А.А. Лобашев<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<sup>1-4</sup>Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>5</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>6</sup>Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

**Резюме.** Цель – определение влияния низких и высоких температур окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки с приведением графических интерпретаций и закономерностей. При проведении исследований использован метод определения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки при широком диапазоне температуры окружающей среды с приведением графических интерпретаций и описанием порядка проведения натурных исследований. Используются закономерности определения среднестатистических показателей снижения и повышения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки для определенного диапазона температуры окружающей среды. Данные исследования проведены в течение зимнего периода 2021 года на базе лаборатории материаловедения Института физико-технических проблем Севера СО РАН им. В.П. Ларионова с применением стационарной климатической камеры. Получены контрольные параметры изменения величины генерирующей мощности фотоэлектрической установки (в интервале температур от -60°C до +60°C), которые могут применяться при моделировании эксплуатационных процессов и инженерных расчетах режимов работы солнечных электростанций. Выявлено, что при одинаковых показателях освещенности и температуре среды -60°C фотоэлектрическая панель генерирует максимальную энергию и минимальную энергию при температуре +60°C, снижение удельной мощности при данном диапазоне температуры составило 19%. Значительное уменьшение удельной мощности фотоэлектрической установки достигается при температуре от +30°C и более вследствие увеличения внутреннего сопротивления установки. При температуре менее -40°C достигается незначительное увеличение удельной мощности исследуемой установки вследствие уменьшения внутреннего сопротивления установки. Полученные показатели изменения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при широком диапазоне температуры окружающей среды могут быть применены при разработке методики по оценке влияния температуры среды и ее различных диапазонов на функционирование фотоэлектрических панелей для более точного определения энергетического потенциала солнечной генерации при определенном виде климата. В перспективе планируется выполнение натурных исследований по идентификации характера влияния двух и более климатических факторов на функционирование фотоэлектрической установки.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая установка, температура, генерирующая мощность, климатическая камера, холодный климат, Арктика

**Благодарности:** Результаты исследований, описанные в настоящей статье, подготовлены в рамках выполнения государственного задания по проекту «Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» ФНИ в РФ на 2021–2030 гг. по приоритетному направлению «Основы эффективного развития и функционирования энергетических систем на новой технологической основе в условиях глобализации, включая проблемы энергобезопасности, энергосбережения и рационального освоения природных энергоресурсов».

**Для цитирования:** Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Альзаккар А.М.-Н., Лобашев А.А. Исследование влияния температуры окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 134–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-134-146>.

## Investigating the effects of ambient temperature on photoelectric unit operation

Nikolay P. Mestnikov<sup>1✉</sup>, Pavel F. Vasilyev<sup>2</sup>, Gennadiy I. Davydov<sup>3</sup>, Aleksandr M. Khoyutanov<sup>4</sup>, Ahmad M.-N. Alzakkar<sup>5</sup>, Aleksandr A. Lobashev<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

<sup>1-4</sup>V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia

<sup>5</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>6</sup>The Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russia

**Abstract.** In this paper, effects of low and high ambient temperatures on the operation of a photoelectric unit are investigated. The research methodology consisted in determination of the energy efficiency of a photoelectric unit across a wide range of ambient temperatures, providing graphical interpretations and describing the procedure of field observations. Regularities in determining the average statistical indicators of energy efficiency rise and drop in a photoelectric unit were applied for a particular range of ambient temperatures. These studies were undertaken during the winter of 2021 in the Materials Science Laboratory of V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, using a fixed climate chamber. Reference parameters were obtained for changes in the photoelectric unit generating capacity (within -60°C to +60°C), which can be applied in modeling operational processes and engineering calculations of operating conditions of solar power plants. It was found that, at the same illumination and ambient temperature values, a photoelectric panel generates the maximum energy at -60°C and minimal energy at +60°C, with the specific power drop for this temperature range being 19%. A significant drop in the specific power of the photoelectric unit was achieved at +30 °C and higher due to the increased internal resistance of the unit. For temperatures below -40°C, the specific power of the analyzed unit increased insignificantly due to the decreased internal resistance of the unit. The obtained values of the generating capacity of a photoelectric unit within a wide range of ambient temperatures can be used in developing a procedure for evaluating the effects of ambient temperature and its various ranges on the operation of photoelectric units, as well as for a more accurate determination of the solar generation energy potential under certain climate conditions. In future studies, field observations are planned to identify the nature of the effect of two and more climatic factors on the operation of a photoelectric unit.

**Keywords:** photovoltaic installation, temperature, generating capacity, climate chamber, cold climate, Arctic

**Acknowledgements:** The research results presented in the article were obtained as a part of the state assignment for the project "Research on methods to improve operational reliability and efficiency of intelligent electric power systems in the North and the Arctic" of the Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the period 2021-2030 in the priority direction "Fundamentals of the effective development and operation of energy systems on a new technological basis under globalization including the issues of energy security, energy conservation and rational development of natural energy resources".

**For citation:** Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I., Khoyutanov A.M., Alzakkar A.M.-N., Lobashev A.A. Investigating the effects of ambient temperature on photoelectric unit operation. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):134-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-134-146>.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент электроснабжение Северо-Восточных регионов России производится посредством эксплуатации автономных систем энергоснабжения, представляющих собой дизель-генераторные, газотурбинные, парогазовые, тепловые установки, которые функционируют на основе сжигания дорогостоящего привозного топлива.

К примеру, в Северном энергетическом районе Республики Саха (Якутия) задейство-

вано более 140 дизельных электростанций [1], где среднее годовое потребление дизельного топлива составляет более 122,214 тыс. т условного топлива, что эквивалентно выбросу более 265,448 т углекислого газа в атмосферу, влияющего на повышение среднегодовой температуры на территории Севера и Арктики с последующим изменением климата. Северо-Восточные регионы России имеют слаборазвитую транспортную инфраструктуру, которая приводит к повышению

удельной стоимости ГСМ на 200% при сроках доставки в отдаленные населенные пункты до 2,5 лет [2].

В данных регионах активно внедряются технологии гелиоэнергетики, где по состоянию на конец 2021 года в Якутии эксплуатируется более 21 солнечной электростанции со среднегодовой выработкой электроэнергии до 1,25 МВт·ч при среднегодовой экономии топлива до 356,66 т натурального топлива, что эквивалентно снижению выбросов CO<sub>2</sub> до 1 123 т. В соответствии с Программой инновационного развития ПАО «РусГидро» на 2020–2024 гг. с перспективой до 2029 года, предполагается строительство около 60 новых объектов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (солнечные и ветровые ЭС) на территории Северного энергетического района Якутии с автономной системой электроснабжения.

Таким образом, изучение влияния значительного диапазона температур (высоких и низких) является одним из важнейших параметров окружающей среды наряду с солнечной, активной при функционировании фотоэлектрических установок [3, 4]. В связи с развитием гибридных систем электроснабжения с применением ВИЭ в удаленных и труднодоступных территориях Севера и Арктики указанная задача является актуальной и востребованной.

## АНАЛИЗ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На примере моделирования физических процессов работы фотоэлектрической панели установлено, что при температуре -2°C показатель тока практически не изменяется, а напряжение и мощность панели растут на 11%. В диапазоне отрицательных температур (при -20°C) показатель тока фотоэлектрической панели увеличивается на 2%, напряжение увеличивается на 20% и мощность – на 22%, что показывает увеличение общей энергоэффективности панели в условиях низких температур [5].

В рамках натурных испытаний автономной солнечной системы энергоснабжения на антарктической станции «Восток» установлено, что система показала работоспособность в летний период при температуре -45°C и сохранность фотоэлектрических панелей после

трех зимних периодов при температурах ниже -80°C. В условиях крайне низких температур фотоэлектрические панели сохранили свои рабочие характеристики, но были частично занесены снежным покровом [6].

В источниках [7–9] проведены работы по исследованию дополнительных покрытий для фотоэлектрической панели, где установлено, что генерирующая мощность панели увеличивается вследствие снижения температуры нагрева самой панели. Температура нагрева поверхности панели и выработка электроэнергии значительно зависят от температуры воздушной среды и влажности воздуха. Зафиксировано, что изменения показателей тока и напряжения зависят от поступления солнечной радиации на поверхность принимающей площадки. Вследствие влияния высоких температур от +30°C генерирующая мощность фотоэлектрической панели снижается.

Проведены экспериментальные исследования в целях определения влияния отрицательных и положительных температур среды на работу фотоэлектрических панелей, где установлено, что в случае снижения температуры поверхности панели на 10°C его КПД увеличится на 5% при непрямом охлаждении. В случае снижения температуры поверхности панели на 10°C КПД также увеличится на 10%. Обеспечение непрямого охлаждения фотоэлектрических панелей при эксплуатации в условиях тропического и жаркого климата является одной из главных задач функционирования объектов гелиоэнергетики [10–13].

Известны натурные исследования [14–17], где определено, что поверхностная температура фотоэлектрической панели зависит не только от интенсивности попадания солнечного излучения на поверхность панели, но и от внешних климатических факторов (пылевое загрязнение, снеговой покров и др.). Предложены технические способы и методы по снижению влияния данных факторов на функционирование фотоэлектрической панели, в том числе на ее поверхностную температуру.

Таким образом, целью исследования является определение показателей влияния годовых естественных температур окружающей

среды Северо-Восточной части России на функционирование фотоэлектрической панели при отсутствии влияния других внешних факторов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования проводились на базе лаборатории Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, в рамках которых применялись климатическая камера «М-75/150-1000 КТВХ», стационарный источник света и фотоэлектрическая установка [18], состоящая из фотоэлектрической панели, контроллера заряда, аккумуляторной батареи, вспомогательной нагрузки, измерительных приборов и программного обеспечения для обработки данных.

На рис. 1 представлен внешний вид фотоэлектрической установки внутри климатической камеры.

Определена методика проведения экспериментальных работ по изучению влияния широкого диапазона отрицательных и положительных температур воздушной среды на функционирование фотоэлектрической панели при отсутствии влияния других внешних факторов, которая имеет следующий порядок:

– размещение фотоэлектрической панели и стационарного источника света внутри

климатической камеры;

– включение стационарного источника света и климатической камеры и получение минимальной температуры  $-60^{\circ}\text{C}$ ;

– 30-минутное ожидание промерзания поверхности фотоэлектрической панели;

– включение вспомогательной нагрузки, регистрация электрических параметров работы фотоэлектрической установки в режиме реального времени;

– изменение температуры внутри климатической камеры с шагом в  $1^{\circ}\text{C}$  с последующим измерением электрических параметров;

– получение экспериментальных данных работы фотоэлектрической установки в диапазоне от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ;

– обработка экспериментальных данных;

– оформление результатов обработки экспериментальных данных в виде графических интерпретаций;

– выведение закономерностей функционирования фотоэлектрической установки при различных температурах окружающей среды.

Исходной точкой в рамках определения доли снижения удельной мощности принимается среднегодовая температура воздуха в центральной части Якутии, которая составляет ориентировочно  $12^{\circ}\text{C}$  [19].



**Рис. 1. Внешний вид фотоэлектрической установки внутри климатической камеры**  
**Fig. 1. External view of the photovoltaic installation inside the climate chamber**



Порядок определения удельной мощности в относительных единицах производится по формуле (1):

$$P_{отн.i} = \frac{P_{факт.i}}{P_{начальный}}, \quad (1)$$

где  $P_{отн.i}$  – относительная удельная мощность фотоэлектрической установки при температуре  $i$ , %;  $P_{факт.i}$  – удельная мощность фотоэлектрической установки при температуре  $i$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $P_{начальный}$  – начальная удельная мощность фотоэлектрической установки при температуре -12°C, Вт/м<sup>2</sup>;  $i$  – определенная температура среды, °C.

Предполагается, что кривая зависимости удельной мощности фотоэлектрической установки имеет полиномиальную зависимость. В целях автоматического определения статистической значимости коэффициентов полиномиальной функции применен метод бутстрэпа (от англ. Bootstrap – начальная загрузка). В случайном порядке подбираются  $M = 45$  точек из существующих  $N = 120$ . Ошибка измерения температуры принимается равной 0,5°C. Ошибка измерения удельной мощности составляет 0,002 Вт/м<sup>2</sup>. В общем случае существуют  $Binomial(120, 45) = 2,25 \cdot 10^{33}$  способов

сделать данный выбор, где  $Binomial(N, M) = N!/(M!(N-M)!)$  – значение соответствующего биномиального коэффициента. В работе выбор ограничивается  $5 \cdot 10^5$  вариантом, для каждого из них определяются коэффициенты полиномиальной функции. Изначальным предположением является то, что зависимость удельной мощности от температуры среды описывается полиномиальной функцией степени не выше 5-й по формуле (2):

$$P(T) = \alpha_5 \cdot T^5 + \alpha_4 \cdot T^4 + \alpha_3 \cdot T^3 + \alpha_2 \cdot T^2 + \alpha_1 \cdot T + \alpha_0, \quad (2)$$

где  $P(T)$  – функция зависимости удельной мощности фотоэлектрической установки;  $\alpha_i$  – биномиальный коэффициент в зависимости степени  $i$ ;  $T$  – температура среды, °C;  $i$  – значение степени от 0 до 5.

На рис. 2 представлены кривые плотности вероятностей коэффициентов полиномиальной функции 5-й степени.

Так как с учетом применения критерия Андерсона – Дарлинга [20] распределения вероятностей для коэффициентов полиномиальной регрессии имеют вид нормального

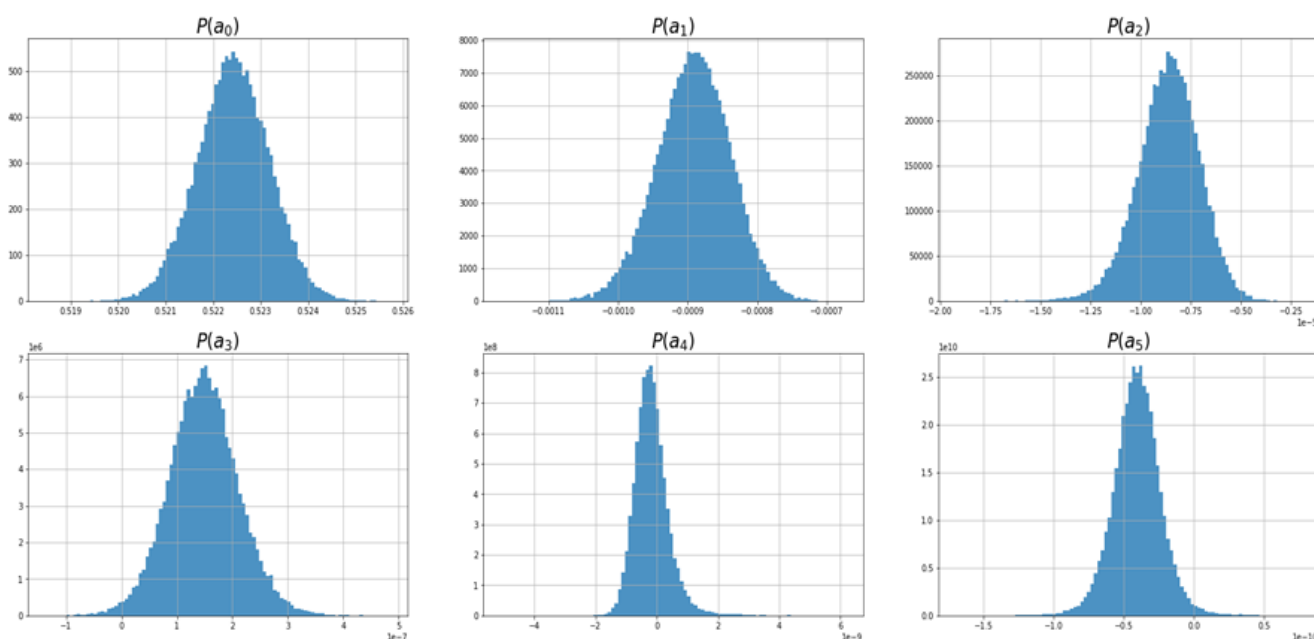


Рис. 2. Кривые распределения вероятностей коэффициентов полиномиальной функции 5-й степени

Fig. 2. Probability distribution curves for the 5<sup>th</sup> order polynomial function coefficients

распределения, для определения статистической значимости коэффициентов применяется *t*-критерий Стьюдента. *T*-статистика Стьюдента, равная отношению среднего значения коэффициента к его стандартному отклонению, вычисляется по распределению вероятностей, полученному методом бутстрэпа, и далее сравнивается с критическим значением 2,58 на уровне значимости 1%.

В табл. 1 представлены значения *t*-статистики Стьюдента для коэффициентов полиномиальной регрессии 5-й степени.

Анализ вышеуказанных рис. 2 и табл. 1 показывает, что искомая зависимость удельной мощности от температуры является квадратичной в интервале температур от -60°C до +60°C. Значения коэффициентов квадратичной функции и их стандартное отклонение приведены в табл. 2. Статистический анализ проведен с применением языка Python.

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды в фактических (Вт/м<sup>2</sup>) и относительных единицах (о.е.), соответственно, где малые показатели удельной мощности обоснованы искусственным световым излучением.

Анализ данных, представленных на вышеуказанном рис. 4, показывает, что зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды имеет полиномиальную зависимость, представлен-

ную в формуле (3). Среднестатистическая интерполяция фактических и расчетных данных удельной мощности на всем температурном промежутке составляет 1,27%. В условиях отрицательных температур фотоэлектрическая установка показывает более эффективную работу, где удельная мощность при минимальной (-60°C) температуре повышается на 1,46%, а при максимальной (+60°C) температуре снижается на 17,8% относительно исходной расчетной температуры (-12°C):

$$P_{\text{фп}} = -9 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,008 \cdot T + 5,227, \quad (3)$$

где  $P_{\text{фп}}$  – удельная мощность фотоэлектрической установки, Вт/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура среды, °C.

Анализ данных, представленных на вышеуказанном рис. 4, показывает, что зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды имеет полиномиальную зависимость, представленную в формуле (4). Среднестатистическая интерполяция фактических и расчетных данных удельной мощности в относительных единицах на всем температурном промежутке составляет 0,022 о.е. В условиях отрицательных температур фотоэлектрическая установка показывает более эффективную работу, где

**Таблица 1.** Значения *t*-статистики Стьюдента для коэффициентов полиномиальной регрессии 5-й степени  
**Table 1.** Student's *t*-statistic values for the 5th order polynomial regression coefficients

Номер коэффициента	0	1	2	3	4	5
Значение <i>t</i> -статистики	685,0	16,9	5,56	2,37	0,29	2,35
Статистически значим на уровне 1%	да	да	да	нет	нет	нет

**Таблица 2.** Значения коэффициентов полиномиальной регрессии 2-й степени для зависимости удельной мощности от температуры и их стандартное отклонение

**Table 2.** The values of the 2nd order polynomial regression coefficients for specific power dependence on temperature and their standard deviation

Номер коэффициента	0	1	2
Значение коэффициента	0,5227	-7,93 · 10 <sup>-3</sup>	-9,2 · 10 <sup>-5</sup>
Стандартное отклонение коэффициента	0,00015	0,44 · 10 <sup>-3</sup>	1,4 · 10 <sup>-5</sup>

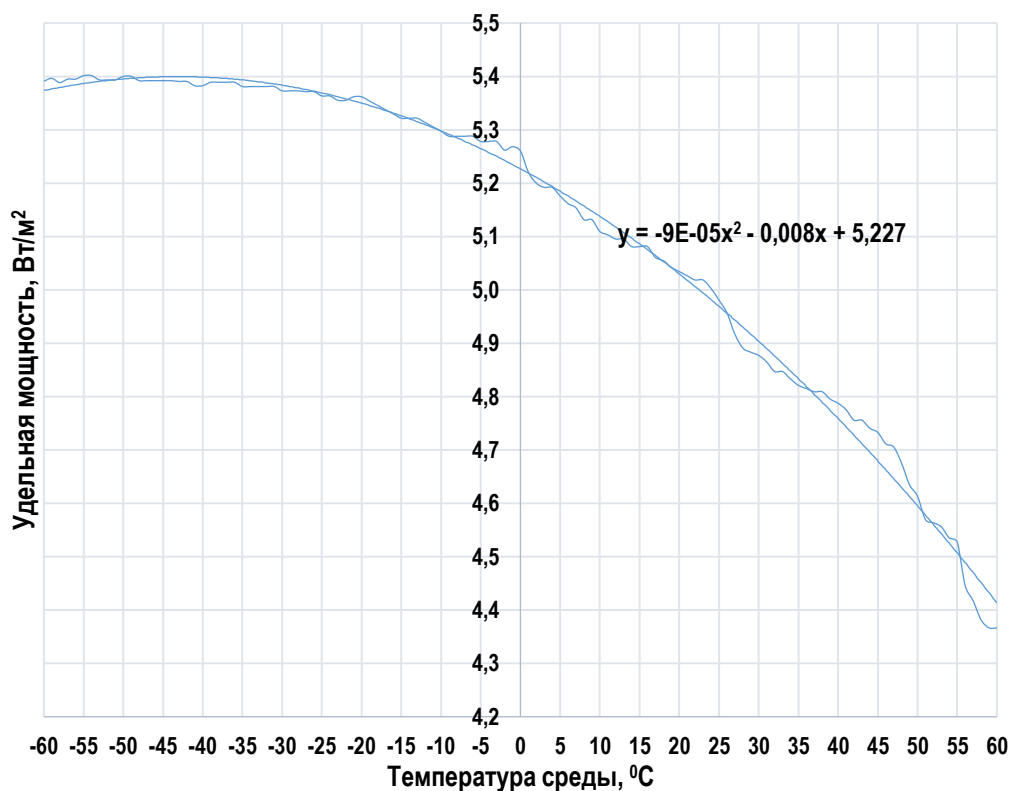


Рис. 3. Зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды  
Fig. 3. Photovoltaic installation specific power vs environment temperature

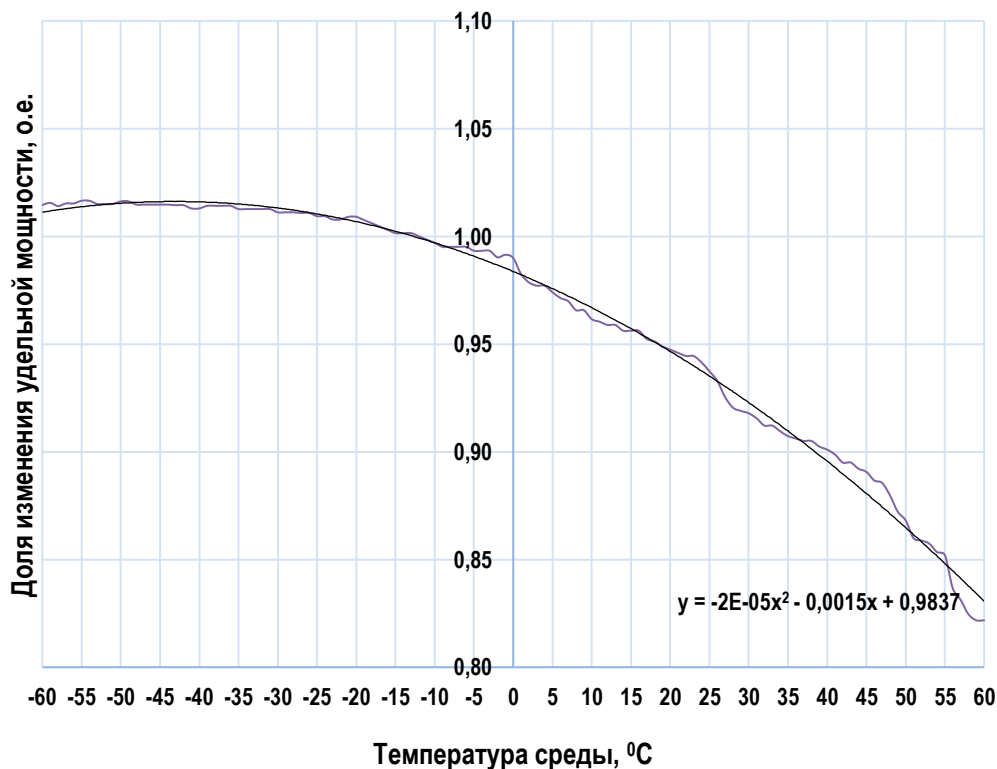


Рис. 4. Зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды в относительных единицах  
Fig. 4. Photovoltaic installation specific power vs environment temperature in relative units

удельная мощность в относительных единицах при минимальной ( $-60^{\circ}\text{C}$ ) температуре повышается на 1,46%, а при максимальной ( $+60^{\circ}\text{C}$ ) температуре снижается на 17,82% относительно исходной расчетной температуры ( $-12^{\circ}\text{C}$ ):

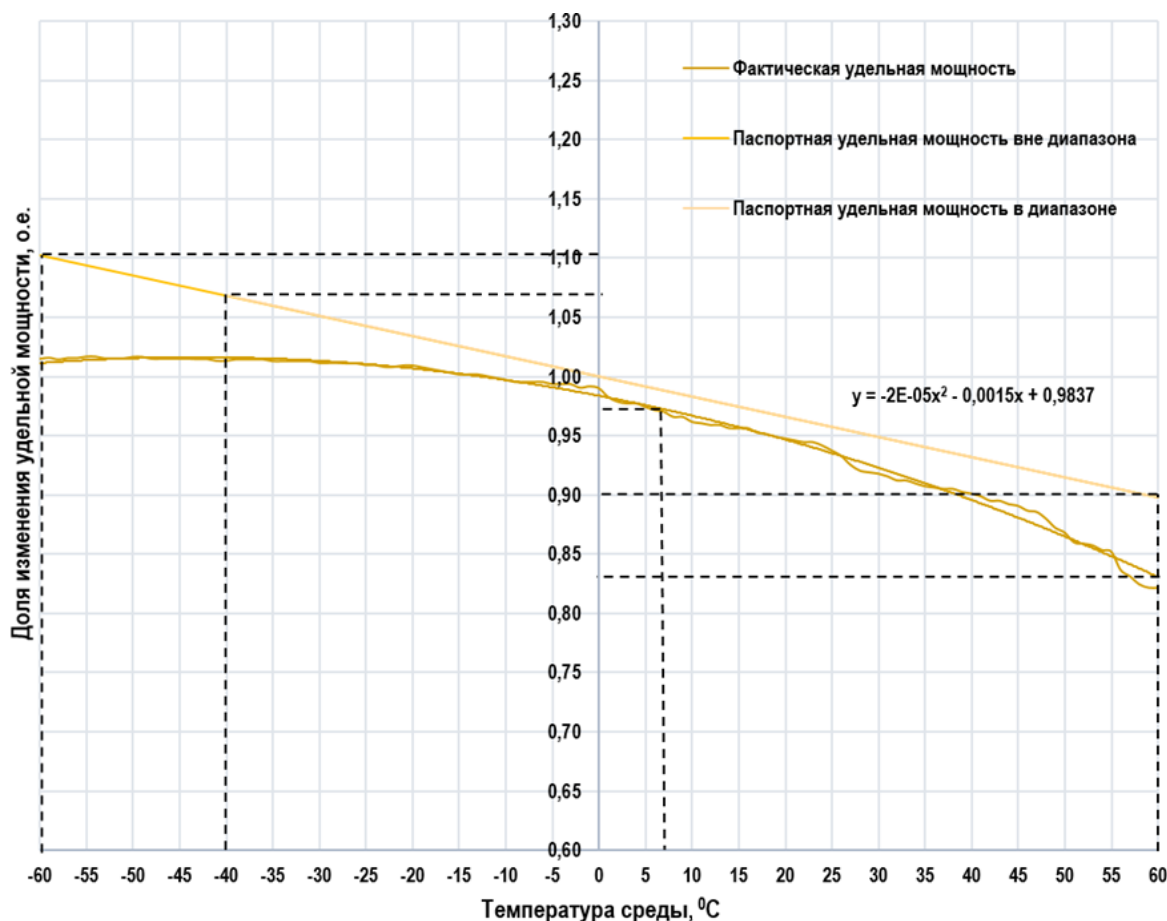
$$P_{\text{фп.о.е.}} = -2 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,0015 \cdot T + 0,9837, \quad (4)$$

где  $P_{\text{фп.о.е.}}$  – удельная мощность фотоэлектрической установки в относительных единицах, о.е.;  $T$  – температура среды,  $^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 5 представлен график сравнения фактической удельной мощности фотоэлектрической установки с прогнозируемыми показателями с применением полученной закономерности (4) и паспортной закономерностью изменения удельной мощности в

относительных единицах.

На вышеуказанном рис. 5 анализ показывает, что кривые фактической (кривая желтого цвета) и прогнозируемой (кривая черного цвета) доли удельной мощности имеют полиномиальную зависимость и практически соответствуют по всем координатам, где средне-статистическая интерполяция составляет порядка 0,055%. Кривая паспортного изменения (кривые синего и коричневого цветов) доли удельной мощности имеет линейную зависимость, но при сравнении с кривыми фактической и прогнозируемой долей удельной мощности зафиксировано среднестатистическое отклонение на 2,45% и 2,20% при диапазоне температуры от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$ ; соответственно, на 2,20% и 1,63% при диапазоне температуры от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ; на 1,63% и 8,48% при диапазоне температуры от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 5. График сравнения фактической, прогнозируемой и паспортной удельной мощности фотоэлектрической установки в относительных единицах**

**Fig. 5. Comparison graph of the actual, predicted and nameplate specific power of a photovoltaic installation in relative units**



**Таблица 3.** Показатели изменения удельной мощности фотоэлектрической установки при различных диапазонах температуры среды**Table 3.** Indicators of changes in the specific power of a photovoltaic installation at different temperature ranges of the environment

Показатель	Единица изменения	Температура, °С	Показатели изменения, %
Удельная мощность	Вт/м <sup>2</sup>	от -60 до -40	-0,163
		от -40 до -20	-0,389
		от -20 до 0	-1,912
		от -60 до 0	-2,464
		от 0 до +10	-2,838
		от +10 до +20	-1,412
		от +20 до +30	-2,957
		от +30 до +40	-1,686
		от +40 до +50	-3,281
		от +50 до +60	-4,641
		от 0 до +60	-16,816
		от -60 до +60	-19,281

В табл. 3 представлены показатели изменения удельной мощности фотоэлектрической установки при различных диапазонах температуры среды.

Данные, приведенные в табл. 3, показывают значительное снижение удельной мощности фотоэлектрической установки при положительных температурах, где в диапазоне от 0°С до +60°С снижение составило 16%. Наиболее значительное снижение удельной мощности приходится при температуре от +40°С.

Данное явление обосновывается тем, что с повышением температуры создается внутреннее сопротивление внутри фотоэлектрической панели, что снижает его эффективность. С ростом температуры среды поток электронов внутри исследуемой панели возрастает, что вызывает увеличение силы тока и падение напряжения. Однако падение напряжения значительно больше, чем увеличение показателя силы тока. В этой связи удельная мощность фотоэлектрической панели уменьшается, что приводит к снижению ее электроэнергетической эффективности.

Полученные результаты и методика определения влияния температуры среды на работу фотоэлектрических панелей могут быть применены в проведении уточненных натурных испытаний новых видов фотоэлектрических панелей в условиях различных типов климата, сопровождающихся резкими пере-

падами температуры среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малая изученность влияния диапазона годовых естественных температур окружающей среды на работу фотоэлектрических установок приводит к возможным ошибкам при проведении прогнозов выработки проектируемой солнечной электростанции, в особенности на территории Северо-Востока России.

В результате проведения экспериментальных исследований обнаружена разница между показателями паспортного и фактического изменения мощности фотоэлектрической установки, которая составила до 8,48% (см. рис. 5).

Показатели снижения удельной мощности фотоэлектрической установки в диапазоне температуры окружающей среды от -60°С до +60°С без изменения других внешних параметров составили более 19%, что доказывает возможность работы данной установки в условиях крайне низких температур окружающей среды.

Данные обстоятельства приводят к необходимости проведения дальнейших исследований и разработке методики по оценке влияния температуры среды при различных ее диапазонах для более точного установления энергетического потенциала солнечной генерации при определенной температуре среды.

### Список источников

1. Местников Н.П., Васильев П.Ф., Альхадж Ф.Х. Разработка гибридных систем электроснабжения для энергоснабжения удаленных потребителей в условиях Севера и Арктики // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 47–56.  
<https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>.
2. Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хожутанов А.М., Альзаккар А.М.-Н. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 4. С. 435–449.  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.
3. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // Journal of Climate. 2010. Vol. 23. Iss. 14. P. 3888–3906.  
<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>.
4. Васильев П.Ф., Местников Н.П. Исследование влияния резко-континентального климата Якутии на функционирование солнечных панелей // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 57–64.  
<https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>.
5. Литвин Н.В. Моделирование физических процессов работы солнечных фотоэлектрических батарей // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 1. С. 46–53.  
<https://doi.org/10.25714/MNT.2020.43.007>.
6. Соловей В.А., Захаров А.А., Карлов Д.С., Булат С.А., Семенихин В.И. Система обеспечения электропитания автономной удаленной автоматической станции для сбора космической пыли на станции Восток в Антарктиде // Гелиогеофизические исследования в Арктике: сборник трудов II Всероссийской конференции (г. Мурманск, 24–26 сентября 2018 г.). Мурманск: Полярный геофиз. ин-т, 2018. С. 85–87.  
<https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.85-87>.
7. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15. № 4. С. 19–29.  
<https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-19-29>.
8. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations // Solar Energy. 2009. Vol. 83. Iss. 5. P. 614–624.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
9. Coelho R.F., Concer F.M., Martins D.C. A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems // Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. 2010.  
<https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2010.5740006>.
10. Philibert C. The present and future use of solar thermal energy as a primary source of energy // International Energy Agency. 2005. [Электронный ресурс]. URL: <http://philibert.cedric.free.fr/Downloads/solarthermal.pdf> (19.03.2021).
11. Aljamali N.M., Kadhium A.J., Al-Jelehawy A.H.J. Review in protection of laboratory and electrical equipment in laboratories and institutions // Journal of Controller and Converters. 2021. Vol. 6. Iss. 1. P. 24–30.
12. Muhsin N.M.B., Alhamdo M.H. Study experiential and numerical for investigation the efficiency inside building structure // European Journal of Molecular & Clinical Medicine. 2020. Vol. 7. Iss. 6. P. 1917–1936.
13. Abed Q.A., Badescu V. Some solar energy technologies and applications // Energy Science and Technology. Vol. 5. Solar Engineering - 1 (Applications) Chapter / Editors S.R. Sivakumar, U.C. Sharma, R. Prasad. Studium Press LLC, 2015.
14. Пат. № 2645444, Российская Федерация, С1, МПК H01L 31/024, H01L 31/042. Устройство и способ автоматизированной очистки солнечной панели / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, Р.Д. Каримов; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. № 2017102270. Заявл. 24.01.2017; опубл. 21.02.2018.
15. Панченко В.А., Сангаджиев М.М., Дегтярев К.С. Влияние пыли и песка на возобновляемые источники энергии в Калмыкии // Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 1. С. 176–183.
16. Амиров Д.И., Зацаринная Ю.Н., Логачева А.Г., Федотов Е.А. Исследование электрических двигателей для автоматизированных систем очистки солнечных панелей // Труды Академэнерго. 2020. № 4. С. 74–85.
17. Зацаринная Ю.Н., Амиров Д.И., Земскова Л.В., Рахматуллин Р.Р. Исследование эффективности работы солнечной панели при воздействии на нее загрязнителей // Труды Академэнерго. 2019. № 1. С. 81–92.
18. Местников Н.П., Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Васильев П.Ф. Исследование эксплуатации комбинированной системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии на Дальнем Востоке России // Вопросы электротехнологии. 2021. № 2. С. 68–81.
19. Mestnikov N., Alzakkar A., Valeev I., Maksimov V.V. Assessment of the performance of the solar power plant with a capacity 150W // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2021.  
<https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537318>.
20. Anderson T.W., Darling D.A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes // Annals of Mathematical Statistics. 1952. Vol. 23. Iss. 2. P. 193–212. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729437>.

### References

1. Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Al'hadzh F. H. Development of hybrid power supply systems for power supply of remote consumers in north and Arctic conditions. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal*. 2021;1:47-56. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>.

2. Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I., Khoyutnov A.M., Alzakkar A.M. Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions. *iPolytech Journal*. 2021;25(4):435-449. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.
3. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming. *Journal of Climate*. 2010;23(14):3888-3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>.
4. Vasilyev P.F., Mestnikov N.P. Research of the effect of the sharply continental climate of Yakutia on the functioning of solar panels. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal*. 2021;1:57-64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>.
5. Litvin N.V. Modeling of physical processes of solar photoelectric batteries operation. *Monitoring. Nauka i tekhnologii = Monitoring. Science and Technologies*. 2020;1:46-53. <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.43.007>.
6. Solovey V.A., Zakharov A.A., Karlov D.S., Bulat S.A., Semenikhin V.I. Power supply system of a stand-alone remote automatic station for cosmic dust collection at Vostok station in Antarctica. In: *Geliogeofizicheskie issledovaniya v Arktike: sbornik trudov. Vserossijskoj konferencii = Helio-geographical studies in Arctic: collected papers*. 24–26 September 2018, Murmansk. Murmansk: Polar Geophysical Institute; 2018, p. 85-87. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.85-87>.
7. Kirpichnikova I.M., Mahsumov I.B. Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy = Electrical facilities and systems*. 2019;15(4):19-29. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-19-29>.
8. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009;83(5):614-624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
9. Coelho R.F., Concer F.M., Martins D.C. A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. 2010. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2010.5740006>.
10. Philibert C. The present and future use of solar thermal energy as a primary source of energy. *International Energy Agency*. 2005. Available from: <http://philibert.cedric.free.fr/Downloads/solarthermal.pdf> [Accessed 19th March 2021].
11. Aljamali N.M., Kadhium A.J., Al-Jelehaw A.H.J. Review in protection of laboratory and electrical equipment in laboratories and institutions. *Journal of Controller and Converters*. 2021;6(1):24-30.
12. Muhsin N.M.B., Alhamdo M.H. Study experiential and numerical for investigation the efficiency inside building structure. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*. 2020;7(6):1917-1936.
13. Abed Q.A., Badescu V. Some solar energy technologies and applications. In: S. R. Sivakumar, U. C. Sharma, R. Prasad (eds.). *Energy Science and Technology. Vol. 5. Solar Engineering - 1 (Applications) Chapter*. Studium Press LLC; 2015. .
14. Ismagilov F.R., Hajrullin I.H., Vavilov V.E., Karimov R.D. *Solar panel design and automated cleaning method*. Patent RF, no. 2645444; 2018. (In Russ.).
15. Panchenko V.A., Sangadzhiev M.M., Degtyarev K.S. Effect of dust and sand on renewable energy sources in Kalmykia. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2017;1:176-183. (In Russ.).
16. Amirov D.I., Zatsarinnaya Yu.N., Logacheva A.G., Fedotov E.A. Study of electric motors for automated solar panel cleaning systems. *Trudy Akademenergo*. 2020;4:74-85.
17. Zatsarinnaya Yu.N., Amirov D.I., Zemskova L.V., Rakhmatullin R.R. Research of efficiency of work of the solar panel under impact on pollutants. *Trudy Akademenergo*. 2019;1:81-92. (In Russ.).
18. Mestnikov N.P., Buryanina N.S., Korolyuk Yu.F., Vasil'ev P.F. Researching the operation of combined power supply systems based on renewable energy sources in the Far East of Russia. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2021;2:68-81. (In Russ.).
19. Mestnikov N., Alzakkar A., Valeev I., Maksimov V. V. Assessment of the performance of the solar power plant with a capacity 150W. In: *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537318>.
20. Anderson T.W., Darling D.A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics*. 1952;23(2):193-212. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729437>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Местников Николай Петрович**,  
аспирант,  
ассистент кафедры электроснабжения,  
Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,  
Республика Саха (Якутия);  
ведущий инженер Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nikolay P. Mestnikov**,  
Postgraduate Student, Assistant Professor of the  
Department of Power Supply,  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Republic of Sakha  
(Yakutia);  
Leading Engineer of the Electric Power Engineering  
Department,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007,

Республика Саха (Якутия)  
✉ sakhacase@bk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

**Васильев Павел Филиппович,**  
к.т.н.,  
заведующий кафедрой электроснабжения,  
Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,  
Республика Саха (Якутия);  
заведующий Отделом электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,  
Республика Саха (Якутия)  
kb-8@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

**Давыдов Геннадий Иванович,**  
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Республика Саха (Якутия)  
dav\_gen@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

**Хоютанов Александр Михайлович,**  
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Республика Саха (Якутия)  
shuriklater@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

**Альзаккар Ахмад Мухаммед-Насер,**  
аспирант,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Яруллина, 6, Россия  
ahmadalzakkar86@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

**Лобашев Александр Алексеевич,**  
аспирант,  
Сколковский институт науки и технологий,  
121205, г. Москва, Большой б-р, 30/1, Россия  
lobashevalexander@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-9522-9996>

Republic of Sakha (Yakutia)  
✉ sakhacase@bk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

**Pavel F. Vasilyev,**  
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Power  
Supply,  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Republic of Sakha  
(Yakutia);  
Head of the Electric Power Engineering Department,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007, Republic of Sakha  
(Yakutia)  
kb-8@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

**Gennadiy I. Davydov,**  
Researcher of the Electric Power Engineering  
Department,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha  
(Yakutia)  
dav\_gen@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

**Aleksandr M. Khoyutanov,**  
Researcher of the Electric Power Engineering  
Department,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha  
(Yakutia)  
shuriklater@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

**Ahmad M.-N. Alzakkar,**  
Postgraduate Student,  
Kazan State Power Engineering University,  
6 Yarullin St., Kazan 420066, Russia  
ahmadalzakkar86@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

**Aleksandr A. Lobashev,**  
Postgraduate Student,  
The Skolkovo Institute of Science and Technology  
(Skoltech),  
30/1, Bolshoy Boulevard, Moscow 121205, Russia  
lobashevalexander@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-9522-9996>

**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.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 12.05.2022; принята к публикации 25.01.2023.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 12.05.2022; accepted for publication 25.01.2023.