

Математическое моделирование фотоэлектрических панелей, как составляющей комплекса распределенной генерации

В.З. Ковалев, А.О. Парамзин, О.В. Архипова

Югорский государственный университет

Аннотация: В данной работе, на основании российского и зарубежного опыта математического моделирования фотоэлектрических установок, авторами рассматриваются подходы к построению данных моделей. Актуальность исследования подтверждается широким распространением источников электрической энергии, использующих энергию солнца. Приводится схема замещения фотоэлектрического элемента и зависимости, описывающие процессы, происходящие в ней. Авторами делается вывод о том, что несмотря на большое количество разнообразных математических моделей фотоэлектрических элементов все их можно сгруппировать по двум категориям. К первой относятся модели, рассматривающие фотоэлектрические панели как отдельный элемент, ко второй категории относят модели, где фотоэлектрическая панель является составляющей генерирующего комплекса. Несмотря на различие в анализируемых подходах авторы выделяют ряд параметров, характеризующих работу фотоэлектрической панели и достаточных для получения результатов моделирования с требуемой точностью.

Ключевые слова: фотоэлектрическая панель, математическое моделирование, схема замещения, распределенная генерация, генерация электроэнергии.

С каждым годом применение фотоэлектрических панелей в деятельности человека носит все более широкий характер. Такие панели нашли применение в системах горячего водоснабжения в качестве источника электрической энергии и системы фотоэлектрического нагрева воды [1], нефтегазовом секторе [2], а также они являются перспективным направлением развития энергетики в регионах, находящихся в окрестности 60° широты [3]. В последние годы фотоэлектрические элементы активно используются для питания установок кондиционирования, вентиляционных и насосных станций [4] в отдаленных и изолированных районах, где электроснабжение посредством централизованных сетей экономически нецелесообразно или недоступно по другим причинам.

Подобные районы формируются одним или несколькими населенными пунктами, для которых часто характерна большая удаленность,

транспортная недоступность и, как следствие, сложные логистические схемы транспортировки топлива для энергоснабжения. Наибольшей концентрацией таких районов в РФ являются территории Крайнего Севера, Дальнего Востока и Сибири [5]. Обеспечение электричеством таких районов возможно за счет построения и дальнейшего внедрения автономных энергосистем. Как правило, здесь основным источником электроэнергии являются дизельные генераторы, работающие на ископаемом топливе и нуждающиеся в его больших запасах. Если говорить о топливе для дизель-генераторов, то, помимо высокой стоимости доставки в изолированные районы, оно обладает нестабильной ценовой политикой на рынке [6]. Эти факторы делают актуальной задачу развития изолированных энергосистем за счет источников электроэнергии, альтернативных традиционной дизель-генераторной установке [7].

Совокупность изложенных выше факторов вместе с возрастающей привлекательностью альтернативных источников электрической энергии (АИЭ) создают альтернативный путь развития децентрализованных энергосистем за счет построения гибридных систем микрогенерации. Внедрение и развитие микросетей с использованием АИЭ позволяет на этапе проектирования минимизировать инвестиции, а также учитывать возможность их последующей модификации в соответствии с развитием энергосистемы, условиями работы генерирующего комплекса и объекта электроснабжения, а также состоянием экономической системы [8]. Проектирование, строительство и последующий ввод в эксплуатацию электростанций с использованием АИЭ стали обыденностью. В регионах активно разрабатываются и внедряются проекты с использованием АИЭ, в том числе, гибридные солнечно-дизельные электростанции [9, 10]. Для таких электростанций главная задача – получить максимум мощности от

фотоэлектрической установки в регионе ее расположения при выполнении существующих требований к качеству рабочего процесса [11].

В качестве потенциальных областей применения микросетей [12] приводит курортно-заповедные зоны (заповедники, удаленные игровые лагеря), объекты общественного пользования (уличное освещение, светофоры), временные объекты после стихийных бедствий, а также объекты локального производства (снабжение малых производственных предприятий).

Перспективность внедрения и развития солнечной энергетики, обоснованная выше, определяет интерес российских и мировых исследователей в области моделирования фотоэлектрических панелей. Так, например, [13] отмечает, что качественно построенная математическая модель позволяет осуществлять поведенческий прогноз генерирующей установки по отношению к таким параметрам, как температура, сопротивление и солнечное излучение на поверхности фотоэлектрической панели. Кроме того, возможно обоснование применения фотоэлектрических панелей определенного типа, сравнение их рабочих характеристик и исследование эффективности фотоэлектрических панелей из различных материалов.

Таким образом, исходя из высоких инвестиционных составляющих на строительство автономных систем электроснабжения, а также необходимости максимального замещения углеводородных ресурсов при производстве электроэнергии в микросетях, задачу определения выходных зависимостей фотоэлектрических панелей под воздействием различных факторов окружающей среды можно считать актуальной.

При анализе отечественного и мирового опыта в области моделирования солнечных панелей можно выделить два подхода. Один из них рассматривает фотоэлектрическую панель, как отдельно взятый

компонент системы электроснабжения и исследует параметры выходной мощности в зависимости от различных факторов входа.

Для этого может использоваться классическая схема замещения фотоэлектрической ячейки с одним диодом, представленная на рис. 1. Данная схема замещения фотоэлектрического элемента получила широкое распространение и с целью оценки влияния освещенности и температуры фотоэлемента на его характеристики. Такая модель используется при расчете генерирующих установок как с последовательным, так и параллельным соединением элементов [14].

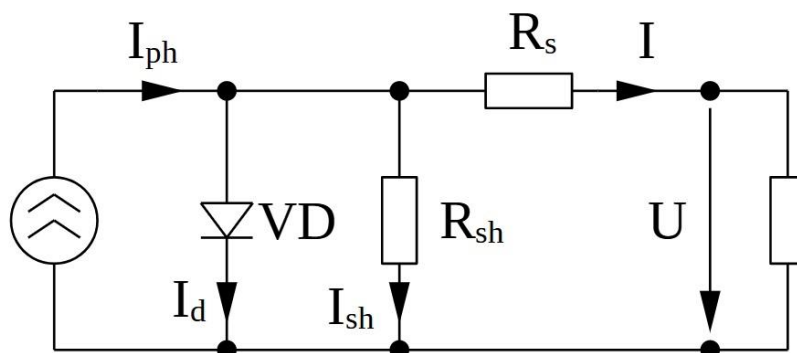


Рис. 1 – Однодиодная схема замещения фотоэлектрической ячейки

На данной схеме диод VD и ток I_d , проходящий через него, параллельно соединены с ветвью, содержащей источник тока I_{ph} , данный контур является моделью p-n перехода, с которым последовательно соединен резистор R_s , характеризующего активное сопротивление соединительных контактов и самой фотопанели и ветвь с шунтирующим сопротивлением R_{sh} , моделирует обратное сопротивление p-n перехода и сопротивление проводящих пленок элемента.

Соответственно, уравнение тока нагрузки I можно записать следующим образом:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(U + I \cdot R_s)}{NkT} - \frac{U + I \cdot R_s}{R_{sh}} \right]$$

где I_{ph} – фототок, зависящий от солнечной радиации, определяемый, как:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \cdot \frac{B}{1000}$$

I_s ток насыщения диода, который выражен кубической зависимостью от температуры следующим образом:

$$I_s(T) = I_{RS} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{N}} \cdot \exp \left(\frac{qU_t}{Nk \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \right)$$

Здесь T – это температура фотоэлектрического элемента, I_{sc} – ток короткого замыкания, k – постоянная Больцмана, K_i – температурный коэффициент тока короткого замыкания, T_{ref} – эталонная температура, B – величина солнечной инсоляции в Вт/м², N – коэффициент идеальности диода, N_t – Количество солнечных панелей, U_t – тепловое напряжение диода

Обратный ток насыщения диода I_{RS} в данной зависимости для стандартных условий можно приближенно определить следующим образом:

$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{\exp \frac{qU}{NkTN_i}}$$

В связи с зависимостью уравнения тока нагрузки от параметров R_s и R_{sh} , током I_{sh} через шунтирующее сопротивление иногда пренебрегают в виду большой величины шунтирующего сопротивления. Реализация и апробация подобной математической модели приведена в [15], где для фотоэлектрических панелей, в зависимости от уровня солнечной радиации и температуры, выполнено моделирование режимов работы и дальнейшее построение вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик, а также получено следующее выражение, определяющее связь выходной мощности солнечной панели с температурой фотоэлектрического модуля и солнечной радиацией:

$$P = (0,2465G - 0,1378) \cdot \left(\frac{100 + 0,759 \cdot (25 - t)}{100} \right)$$

Аналогичный подход с использованием однодиодной схемы замещения предложен [16], однако автор отмечает важность исследования фотоэлектрической системы электроснабжения, как сложного комплекса, состоящего из набора взаимосвязанных элементов, основная задача которых: преобразование энергии солнца в электричество. Как правило, такие системы представлены фотоэлектрической установкой, накопителем электрической энергии, контроллером, инвертором и нагрузкой. Помимо этого для фотоэлектрической панели отмечается важность моделирования данных компонентов при различных данных солнечной инсоляции и температурных режимов работы [17].

В работе [18] приведена улучшенная электрическая схема фотоэлектрической генерирующей системы, а также предложено дополнение в виде элементов, контролирующих точку максимальной мощности, увеличена эффективность генерации энергии. Также описывается метод моделирования режимов работы фотоэлектрических (PV) модулей, реализованный в программе Matlab/Simulink. Автором предлагается модифицированная поведенческая модель, которая оценивает напряжение и потенциал тока фотоэлектрической панели в заданных условиях эксплуатации (солнечная инсоляция и температура) и использует однодиодную схему замещения, однако исключает из нее параллельную ветвь с шунтирующим сопротивлением и выражение, связывающее ток нагрузки сводится к:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(U+I \cdot R_s)}{\alpha} - 1 \right]$$

где α – коэффициент завершения измерения теплого напряжения, В.

Другие вариации схемы замещения и уравнений, описывающих состояние фотоэлектрических модулей также представлены в работах [19] и [20], в последней авторами использовался готовый блок PV Array в среде Matlab. В работе [21] математическая модель фотоэлектрической установки

была усовершенствована и реализована на языке Delphi. Ее программа, как и у авторов, упомянутых выше, позволяет учесть интенсивность солнечного излучения, температуру окружающей среды, технические характеристики и степень пространственной ориентации фотоэлектрического преобразователя.

В работе [14] выходная мощность фотоэлектрических модулей также связывается с температурой, однако уравнение связи имеет следующий вид:

$$P_{\text{ФЭС}} = \frac{C_F \cdot N \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G)}{T_{\text{ФЭС}}}$$

Здесь C_F – определяется из паспортных данных солнечной панели, N – количество солнечных панелей, образующих станцию, G – текущий уровень солнечной радиации для заданной местности, $T_{\text{ФЭС}}$ – текущая температура фотоэлектрического модуля

При построении математической модели фотоэлектрической установки [17] отмечается, что в отдельных составляющих комплекса электроснабжения есть разброс постоянных времени, характеризующих скорость протекания процессов в нем. Так, например, малые значения скорости характерны для элементов, имеющих в своем составе полупроводниковые преобразователи, а большим значениям постоянной времени могут соответствовать такие элементы фотоэлектрического комплекса, как АКБ или нагрузка. Данное обстоятельство позволяет оправдать возникающие при построении адекватных математических моделей компонентов проблемы, наравне с этим это может являться подтверждением необходимости декомпозиции для рассмотрения вне состава генерирующего комплекса. В данной работе входными параметрами математической модели являются координаты местности, коэффициент отражения земной поверхности (альбедо), день в году, индекс прозрачности атмосферы, скорость ветра для заданной местности, оптимальные углы

установки фотоэлектрических модулей, характеристики солнечного трекера и отклонения среднесуточной температуры окружающего воздуха.

В отличие от [17], методология математического моделирования выработки электрической энергии в работе [22] упрощается тем, что ее параметры группируются следующим образом: в качестве постоянных параметров используются параметры, отвечающие за территориальное расположение установки, а переменными параметрами, изменяющимися в ходе моделирования, являются средние значения солнечной инсоляции.

В ранее упомянутой работе [16] также делается важное уточнение о стохастическом характере метеорологических факторов, в связи с чем диапазон принимаемых значений постоянной времени находится от сотых долей секунды до десятилетий. Данный факт приводит к необходимости использования аппарата вероятностных методов прогноза. Важным замечанием будет упоминание о том, что характеристики солнечных панелей, изложенные в паспортных данных, принимаются производителями и получаются при постоянстве различных внешних факторов. Данные параметры в реальных условиях носят стохастический характер, соответственно, при определении выходной мощности фотоэлектрической панели необходимо учитывать каждый из них.

В [23] предлагается вероятностная модель фотоэлектрической установки. Модель опирается на детерминированный подход и в качестве определяющего выделяет единственный фактор. В предложенной модели мощность солнечной панели определяется, исходя из интенсивности солнечного излучения и фактора неопределенности, под которым подразумевается температура фотоэлектрического модуля:

$$P_{det.СЭС} = (1 - \alpha\eta_{ФЭС})P_{устФЭС}$$

Где $\eta_{\text{ФЭС}}$ – коэффициент полезного действия фотоэлектрической панели, соответственно – установленная мощность этой панели, α коэффициент идеальности, определяемый, как:

$$\alpha = \alpha_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)$$

Анализ существующих подходов показал, что российские и зарубежные исследователи при моделировании фотоэлектрических панелей действуют по двум сценариям. Первый из них предполагает моделировать панели, как отдельную составляющую генерирующей установки. Другой подход подразумевает построение модели с позиции группы взаимосвязанных элементов, где солнечная панель является одной из переменных, влияющей на работу генерирующего комплекса в целом. Несмотря на различия в подходах к построению математических моделей, для обоих случаев характерно обширное применение при исследовании однодиодной схемы замещения в различных вариациях. Данный факт, как правило, принято ассоциировать с простотой данной схемы. Кроме того, применение подобной модели при моделировании сложных систем позволяет получить результат с требуемой точностью для практики и, соответственно, не требует больших вычислительных затрат. Указанная модель реализована в различных пакетах прикладных программ и удовлетворяет требованиям исследователей. За рамками рассмотрения данной статьи остаются вопросы идентификации ее параметров.

Предлагаются и более сложные модели, учитывающие дополнительные факторы. Однако, выходные параметры этих моделей, которые используются в дальнейших расчетах преобразований энергии в электротехнических комплексах показывают, что фактически используются энергетические переменные, аналогичные полученным из модели, опирающейся на



однодиодную схему замещения. Величины этих переменных, вне зависимости от сложности данных моделей, качественно не изменяются.

Литература

1. Фрид С.Е., Лисицкая Н.В. Фотоэлектрические генераторы для горячего водоснабжения // Интеллектуальная электротехника. 2018. №4. С. 52-62.

2. Лебедева М.А., Идиятуллина Э.Ф., Чухлатый М.С., Набоков А.В. Целесообразность применения возобновляемых источников энергии на промышленных предприятиях // Инженерный вестник Дона, 2019, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6189.

3. Большаник П.В., Евланов Е.А., Исламутдинов В.Ф., Исламутдинова Д.Ф., Ковалев В.З., Рыбина В.Б., Санников Д.В., Татьянкин В.М., Тей Д.О., Устюжанцева А.Н., Шубина В.И. Исследование эволюции, институциональных условий и факторов развития отраслей экономики северного ресурсодобывающего региона (на примере Ханты-Мансийского автономного округа - Югры). Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2017. 445 с.

4. Odesola I. Design of A Small Scale Solar Powered Water Pumping System // International Journal for the History of Engineering & Technology. 2020. № 8. P. 471-478.

5. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. №6. Т. 331. С. 184-96.

6. Динамика цены на Дизельное топливо // Проект Росфильм. ООО "Новые Информационные Технологии", 2022 URL: monitoring.rosfirm.ru/table/dizelnoe-toplivo-pmc1894.htm.

7. Ковалев В.З., Архипова О.В. Методика оптимизации структуры парка ветро-дизельных электростанций // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. № 4. С. 112-125.

8. Колосов Р.В., Максимов Ю.М., Титов В.Г. Проектирование малых энергосистем на основе возобновляемых источников энергии // Инженерный вестник Дона, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2713.

9. В Югре появилась первая дизель-солнечная электростанция // Медиахолдинг Югра, 2018. URL: ugra-tv.ru/news/zhkhh/v_yugre_poyavilas_pervaya_dizel_solnechnaya_elektrstantsiya.

10. Запущена крупнейшая солнечная электростанция 22 апреля в селе Няксимволь Березовского района // Акционерное общество "Югорская энергетическая компания децентрализованной зоны". URL: ugra-energo.ru/news/zapushchena-krupneyshaya-solnechnaya-elektrstants.

11. Карминская Т.Д., Ковалев В.З., Ципорин П.И. Математическая модель оценки показателей качества деятельности системы однородных объектов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. №2. С. 181-184.

12. Саврасов Ф.В., Лукутин Б.В. Расчёт эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. №6. Т. 322. С. 17-21.

13. Шарифов, Б.Н., Терегулов Т.Р. Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/Simulink // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. №4. Т. 19. С. 77-83.

14. Абдали Л.М., Исса Х.А., Али К.А., Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы с использованием среды MATLAB/Simulink // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 21. С. 97-105.



15. Кугучева Д.К., Харитонов М.С. Оценка влияния условий эксплуатации на функционирование фотоэлектрических панелей // XIX международная научная конференция «инновации в науке, образовании и предпринимательстве – 2021». Калининград. С. 599-606.

16. Issa H.A., Mohammed H.J., Abdali I.M., Al Bairmani A.G., Ghachim M. Mathematical Modeling and Controller for PV System by Using MPPT Algorithm // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. №1. С. 96-101.

17. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия ТПУ. 2017. №6. URL: cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-rezhimov-raboty-avtonomnoy-fotoelektricheskoy-stantsii-s-uchetom-realnyh-usloviy-ekspluatatsii.

18. Абдали Л.М., Мохаммед Х.Д., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Коровкин Н.В., Бордан Д.Ф. Моделирование режимов работы фотоэлектрической системы // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. №3. С. 78-87.

19. Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Низамов М.О., Соловьев Б.А. Моделирование автономной солнечной электростанции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1. С. 44-54.

20. Юсупов Д.Т., Юсупова Ф.Т. Моделирование работы фотоэлектрической системы малой мощности при помощи пакета Simulink // Universum: технические науки. 2021. №7. С. 31-34.

21. Кенден К.В. Математическая модель вырабатываемой мощности фотоэлектрического преобразователя // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2021. №4. URL: cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-vyrabatyvaemoy-moschnosti-fotoelektricheskogo-preobrazovatelya.

22. Пьянзина Н.Н. Сташко В.И. Математическое моделирование фотоэлектрической установки для электрификации сельских районов // Интеллектуальная энергетика. 2021. С. 272-278.

23. Киргизов А.К. Стохастическая модель прогнозирования генерации электроэнергии солнечной фотоэлектрической панели // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. 2020. № 4. С. 22-26.

References

1. Frid S.E., Lisitskaya N.V. *Intellektualnaya elektrotehnika*. 2018. №4. P. 52-62.

2. Lebedeva M.A., Idiyatullina E.F., Chukhlatyy M.S., Nabokov A.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2019, №9 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6189.

3. Bol'shanik P.V., Yevlanov YE.A., Islamutdinov V.F., Islamutdinova D.F., Kovalev V.Z., Rybina V.B., Sannikov D.V., Tat'yankin V.M., Tey D.O., Ustyuzhantseva A.N., Shubina V.I. *Issledovaniye evolyutsii, institutsional'nykh usloviy i faktorov razvitiya otrasley ekonomiki severnogo resursodobyvayushchego regiona (na primere Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga - Yugry)* [The study of the evolution, institutional conditions and factors of development of the sectors of the economy of the northern resource producing region (on the example of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Ugra)]. Khanty-Mansiysk: Yugorskiy gosudarstvennyy universitet, 2017. 445 p.

4. Odesola I. *International Journal for the History of Engineering & Technology*. 2020. № 8. pp. 471-478.

5. Lukutin B.V., Muravyev D.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2020. №6. Т. 331. pp. 184-96.

6. *Dinamika tseny na Dizelnoye toplivo* [Dynamics of the price of diesel fuel]. *Proyekt Rosfilm. OOO "Novyye Informatsionnyye Tekhnologii"*, 2022. URL: monitoring.rosfirm.ru/table/dizelnoe-toplivo-pmc1894.htm.

7. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Neftegazovoye delo. 2014. Vol. 12. № 4. pp. 112-125.

8. Kolosov R.V., Maksimov YU.M., Titov V.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2713.

9. V Yugre poyavilas pervaya dizel-solnechnaya elektrostantsiya [The first diesel-solar power plant appeared in Ugra]. Mediakholding Yugra, 2018, URL: ugratv.ru/news/zhkkh/v_yugre_poyavilas_pervaya_dizel_solnechnaya_elektrorstantsiya.

10. Zapushchena krupneyshaya solnechnaya elektrostantsiya 22 aprelya v sele Nyaksimvol Berezovskogo rayona [The largest solar power plant was launched on April 22 in the village of Nyaksimvol, Berezovsky district]. Aktsionernoye obshchestvo "Yugorskaya energeticheskaya kompaniya detsentralizovannoy zony" URL: ugra-energo.ru/news/zapushchena-krupneyshaya-solnechnaya-elektrostants.

11. Karminskaya T.D., Kovalev V.Z., Tsyporin P.I. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. 2011. №2. pp. 181-184.

12. Savrasov F.V., Lukutin B.V. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2013. №6. V. 322. pp. 17-21.

13. Sharifov, B.N., Teregulov T.R. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. №4. V. 19. pp. 77-83.

14. Abdali L.M., Issa KH.A., Ali K.A., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost. 2021. № 21. pp. 97-105.

15. Kugucheva D.K., Kharitonov M.S. XIX Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «innovatsii v nauke, obrazovanii i predprinimatelstve – 2021». Kaliningrad, 2021. pp. 599-606.

16. Issa H.A., Mohammed H.J., Abdali I.M., Al Bairmani A.G., Ghachim M. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2021. №1. pp. 96-101



17. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Izvestiya TPU. 2017. №6. URL: cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-rezhimov-raboty-avtonomnoy-fotoelektricheskoy-stantsii-s-uchetom-realnyh-usloviy-ekspluatatsii.
18. Abdali L.M., Mokhammed KH.D., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Korovkin N.V., Bordan D.F. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2021. №3. pp. 78-87.
19. Khaziyeva R.T., Kirillov R.V., Nizamov M.O., Solovyev B.A. Elektrotekhnicheskkiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy. 2021. № 1. pp. 44-54.
20. Yusupov D.T., Yusupova F.T. Universum: tekhnicheskkiye nauki. 2021. №7. pp. 31-34.
21. Kenden K.V. Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye i fiziko-matematicheskkiye nauki. 2021. №4. URL: cyberleninka.ru/article/n/matematiceskaya-model-vyrabatyvaemoy-moschnosti-fotoelektricheskogo-preobrazovatelya.
22. Pyanzina N.N. Stashko V.I. Intellektualnaya energetika. 2021. pp. 272-278.
23. Kirgizov A.K. Politekhnicheskyy vestnik. Seriya Inzhenernyye issledovaniya. 2020. № 4. pp. 22-26.