



Столыпинский  
вестник

Научная статья

Original article

УДК 62

## **МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ**

**METHODS FOR DETERMINING THE MAXIMUM POWER POINT OF  
A PHOTOELECTRIC BATTERY**

**Балаев Петр Андреевич**, студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г Москва, Красноказарменная ул., 14

**Сивеев Тихон Максимович**, студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г Москва, Красноказарменная ул., 14

**Груздов Андрей Геннадьевич**, магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г Москва, Красноказарменная ул., 14

**Пашковская Екатерина Евгеньевна**, магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г Москва, Красноказарменная ул., 14

**Balaev Pyotr Andreevich**, student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

**Tikhon Maximovich Siveev**, student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

**Gruzdov Andrey Gennadievich**, Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

**Pashkovskaya Ekaterina Evgenievna**, Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

**Аннотация:** В данной статье рассматривается актуальность использования солнечной энергии, целесообразность эксплуатации автономных гибридных систем на базе ВИЭ, в частности, на базе СЭС. Приводится алгоритм поиска точки максимальной мощности фотоэлектрической батареи. Рассматривается необходимость применения контроллера заряда.

**Abstract:** This article discusses the relevance of the use of solar energy, the feasibility of operating autonomous hybrid systems based on renewable energy sources, in particular, based on solar power plants. An algorithm for finding the point of maximum power of a photovoltaic battery is given. The necessity of using a charge controller is considered.

**Ключевые слова:** Smart Grid, солнечная энергия, МРРТ, точка максимальной мощности, контроллер заряда.

**Keywords:** Smart Grid, solar power, MPPT, maximum power point, charge controller.

В современном мире высокий спрос на электроэнергию абсолютно оправдан: интенсивное развитие промышленности, рост числа бытовых

потребителей, энергоёмкие научные проекты и многое другое. Но с течением времени люди стали свидетелями последствий, к которым приводит активное использование электрических станций, работающих на ископаемом топливе. Помимо очевидных экологических проблем аргументами для модернизации электроэнергетической отрасли стали заявления ученых о том, что мировые запасы ископаемого топлива при сохранении существующих тенденций истощатся в ближайшие 50-100 лет. Например, глава Минприроды России в своём выступлении заявил, что в РФ запасов нефти хватит на 59 лет, газа – на 103 года [1].

В погоне за экономичным и максимально рациональным использованием имеющихся ресурсов ученые пришли к выводу о необходимости использования smart систем – систем, способных автоматически выполнять функции распределения и отслеживания потоков электрической энергии. Данные системы особенно эффективно работают при использовании электростанций на базе ВИЭ, повышают надёжность и безопасности электроэнергетической системы.

Примером совокупности smart технологий, получившей широкое распространение, можно считать Smart Grid. Smart Grid входит в состав модернизированных сетей электроснабжения и использует информационные и коммуникационные сети для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении. Данная технология включает в себя как умные счетчики, располагаемые непосредственно у потребителя, так и разного вида контроллеры, инверторы, преобразователи [2].

Рассмотрим возможность использования солнечных батарей в качестве источника электроэнергии: оценим преимущества и недостатки применения фотовольтаики, изучим зарубежный опыт, определим, каким образом можно извлечь максимальную выгоду из использования фотоэлектрических панелей (ФЭП), выясним какие технологии применяются в микроэнергосистеме на базе СЭС.

Количество солнечной энергии, достигающей поверхности планеты, колеблется из-за движения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Все эти изменения зависят от времени года, времени суток, погодных условий на освещенной стороне планеты и ряда других факторов. Когда Солнце находится в зените, длина пути прохождения солнечных лучей через атмосферу сокращается, следовательно, больший объем солнечной радиации достигает поверхности планеты.



**Рисунок 1. Уровень инсоляции в России**

Представители Министерства энергетики США подсчитали, что каждый час Землю достигает 430 квинтиллионов джоулей солнечной энергии. Это 430 с восемнадцатью нулями в час. В году 8766 часов. Для сравнения, годовой объём используемой человечеством энергии составляет 410 квинтиллионов джоулей – в 9200 раз меньше [3].

Какими же основными плюсами обладают солнечные генераторы энергии?

- Наличие бесконечного источника электричества. Сравнивая с более популярными энергоносителями, можно отметить, что эффективность

СЭС зависит исключительно от интенсивности солнечного света, дефицита которого не наблюдается.

- Экологичность технологии. В процессе эксплуатации не наблюдается выбросов парниковых газов в атмосферу планеты.
- Высокая надежность батареи. При отсутствии поворотных механизмов в креплении батарей срок службы конструкции составляет около 40 лет, в противном случае срок службы составляет около 25 лет.
- Автономность электроснабжения. СЭС обеспечивают независимость от глобальных энергосетей, что позволяет создать стабильное энергообеспечение в труднодоступных регионах страны.
- Тишина работы. Конструкция батареи не имеет подвижных частей, соответственно, не создаётся шума при работе.
- Возможно увеличение мощности системы путем установки дополнительных ФЭП.

Количество солнечной энергии зависит от географического месторасположения: чем ближе объект к экватору, тем большее количество энергии он получает. Так, среднегодовое суммарное солнечное излучение, приходящееся на земную поверхность в Центральной Европе, Средней Азии и Центральном регионе России составляет около  $1000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , в Средиземноморье –  $1700 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , в Африке и Австралии –  $2200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ [4].

Мировыми лидерами по использованию солнечной энергии являются Германия, Турция и Япония. Остальные страны ЕС и мира также интенсивно наращивают потенциал в сфере альтернативной энергетики в связи с высокой экологичностью и окупаемостью источника.

Стоит заметить, что скорость развития данного направления в энергетике намного выше при государственной поддержке. Так, в Германии простимулировали население применять солнечные батареи для частных

домов путём выдачи кредита под минимальный процент. Результатом данной политики стало увеличение общей мощности установок с 13 до 2500 МВт за 8 лет. Похожая программа реализуется в Японии: владельцам солнечных батарей компенсируют 50% стоимости энергооборудования. Общая площадь панелей в стране, кстати, превысила 35 млн кв. м [5].

Плотность солнечного излучения в средней полосе России выше, чем в некоторых странах ЕС, а из-за огромной площади страны не всегда имеется возможность подвести электричество к отдельным объектам, поэтому интерес к использованию автономных электростанций с подпиткой от ФЭП растет.

Снижающаяся стоимость оборудования, экологичность, низкие эксплуатационные расходы и высокий ресурс ФЭП, не менее 40 лет, делают автономные солнечные электростанции востребованными. Чтобы повысить эффективность автономной системы электроснабжения чаще используют гибридные системы электроснабжения. Гибридные автономные электростанции целесообразно использовать для круглогодичного получения электроэнергии, когда зимой солнца становится мало, нагрузку можно скомпенсировать, например, дизельным генератором.

В состав гибридной системы входят следующие элементы:

- Дизель-генераторная установка;
- Фотоэлектрическая система

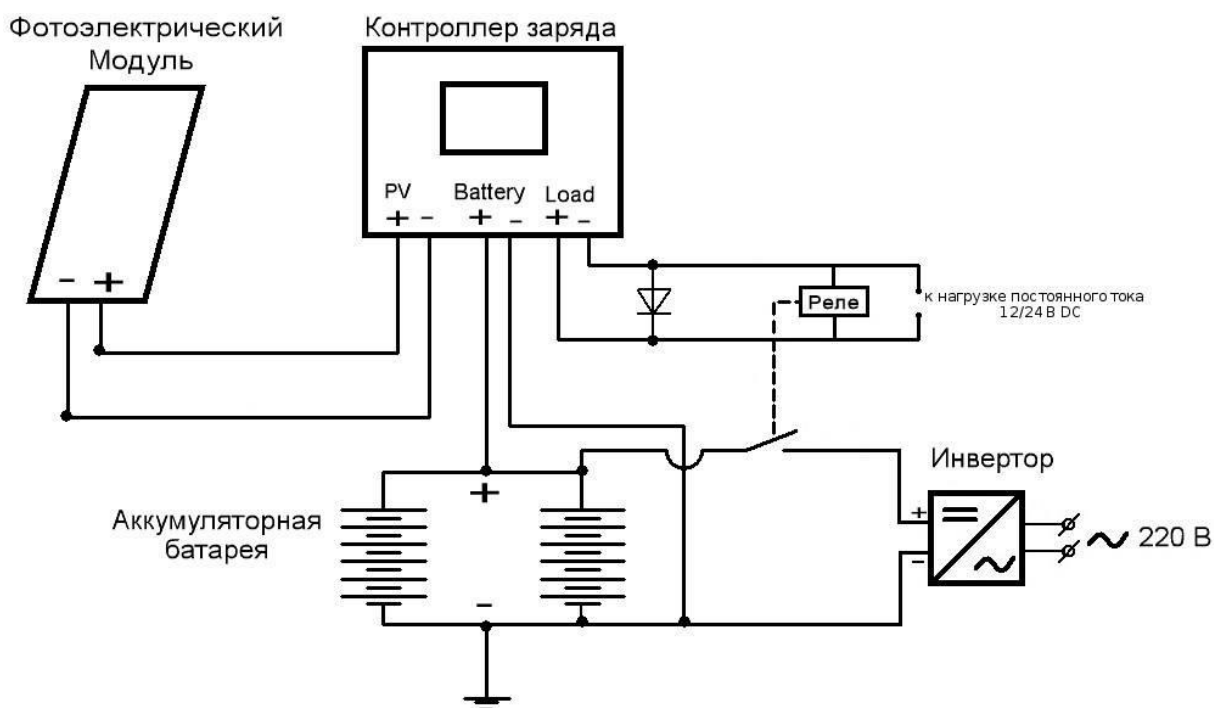
В состав фотоэлектрической системы входят следующие элементы:

- Фотоэлектрические панели, преобразующие солнечное излучение в тепловую и электрическую энергию;
- Контроллер заряда, преобразующий напряжение, поступающее от солнечной батареи в адаптированное для аккумуляторной батареи напряжение;
- Аккумуляторные батареи (АКБ);

- Инвертор, преобразующий постоянное напряжение аккумуляторной батареи в необходимое для питания большинства электрических нагрузок переменное.

Зачем нужен контроллер? Контроллер – промежуточное звено между ФЭП и АКБ, он регулирует ток заряда. Чтобы аккумулятор прослужил дольше, необходимо использовать качественные зарядные устройства. Крайне важно осуществлять полный заряд аккумуляторной батареи. Это возможно при наличии в контроллере нескольких стадий заряда (минимум 3).

Maximum Power Point Tracking (MPPT) – отслеживание точки максимальной мощности – один из способов оптимального использования ресурсов источника энергии. Особенность способа заключается в повышении эффективности работы источника, путём «вытягивания» максимального количества энергии посредством выбора определенного напряжения и тока [6].



**Рисунок 2. Схема и принцип работы контроллера заряда солнечной установки**

Алгоритмы нахождения точки максимальной мощности необходимы, так как ФЭП имеет нелинейную вольтамперную характеристику с единственной точкой, в которой вырабатываемая мощность максимальна. Положение этой точки зависит от температуры и освещённости. Оба условия динамично меняются в течение дня.

Из-за того, что характеристика нагрузки не совпадает с рабочей характеристикой солнечных элементов, вырабатываемая солнечными панелями мощность, не всегда извлекается целиком. Основные алгоритмы МРРТ:

- метод возмущения и наблюдения (Perturb and Observe method (P&O));
- метод постепенно возрастающей проводимости (Incremental Conductance method (IncCond));
- метод паразитной ёмкости (Parasitic capacitances);
- метод постоянного напряжения (Constant Voltage Method).

Более подробно рассмотрим алгоритмы МРРТ [7, 8, 9, 10].

**Метод возмущения и наблюдения (P&O)** заключается в введении в систему небольшого возмущения в виде изменения напряжения. В итоге изменяется выходная мощность солнечной батареи. Если при этом мощность возрастает, то возмущение продолжают вводить в том же направлении. Когда значение пиковой мощности достигнуто, мощность начинает снижаться, а возмущение изменяет направление.

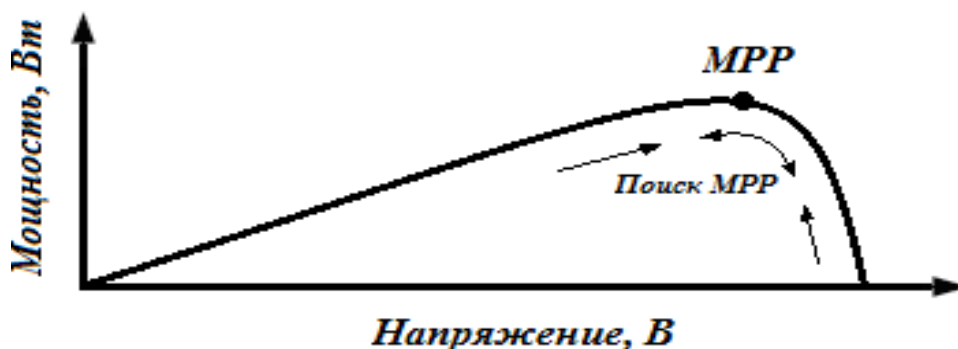


Рисунок 3. Нахождение MPP методом P&O



Алгоритм подразумевает установку номинального напряжения солнечной батареи, соответствующего её пиковой мощности. Недостатком алгоритма является возможность потери следа MPP при резком изменении погодных условий.

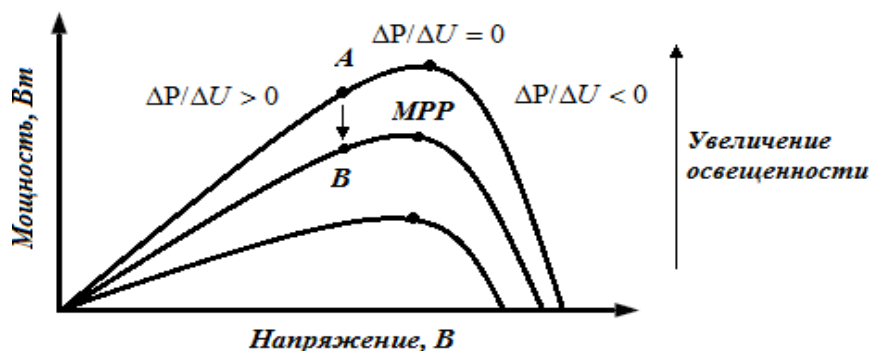


Рисунок 4. Энергетическая характеристика солнечной батареи

Так, при резком снижении интенсивности облучения (переход А-В на рис. 3) изменение мощности не вызвано изменением напряжения, поэтому алгоритм продолжает уменьшать напряжение в неправильном направлении.

Исключить зависимость от резко ухудшающихся погодных условий способен метод постепенно возрастающей проводимости (IncCond).

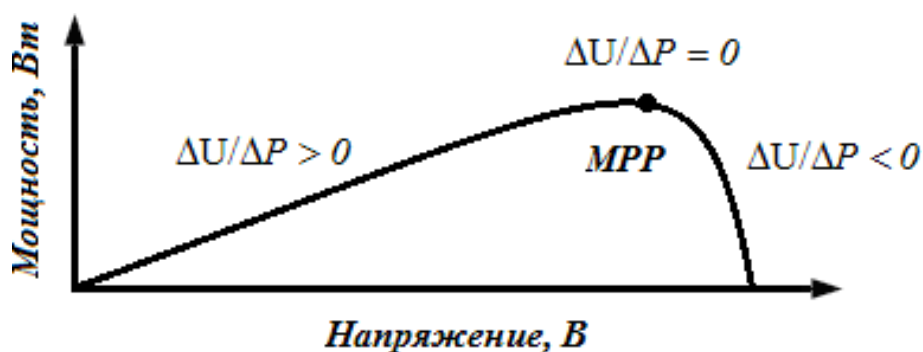


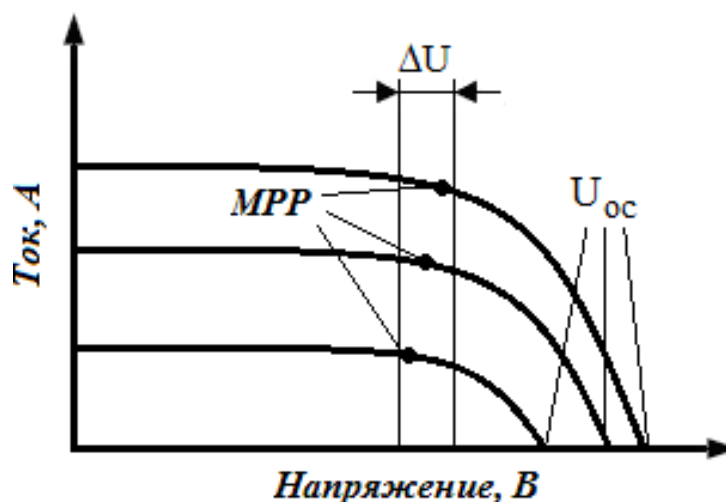
Рисунок 5. Нахождение MPP методом IncCond

Алгоритм способен определить, когда точка максимальной мощности достигнута и прекращает изменение рабочей точки. IncCond позволяет

отследить изменение освещенности с высокой точностью. Недостатком метода является более сложный процесс расчёта при нахождении MPP.

**Метод паразитной ёмкости (Parasitic capacitances)** учитывает влияние паразитной ёмкости ФЭП. С помощью ряда фильтров и добавочных сопротивлений измеряется средняя величина возникших от частых переключений пульсаций мощности и напряжения, после чего определяется электропроводность солнечной батареи и паразитная ёмкость.

В основе метода **постоянного напряжения (Constant Voltage Method)** лежит условие, при котором напряжение в пределах изменения величины  $\Delta U$  в точке MPP при различной интенсивности солнечного излучения одинаково (рис. 5).



**Рисунок 6. Нахождение MPP методом постоянного напряжения**

Преимущество этого метода в том, что MPP может быть определена с высокой скоростью. Однако точность метода низка, так как значение напряжения холостого хода ( $U_{oc}$ ) зависит от температуры солнечной батареи. Отклонения  $U_{oc}$  после измерений может вызвать заметные изменения при нахождении MPP.

Последний метод, который рассмотрим в этой статье, – **метод тока короткого замыкания (Short Circuit Current method)**. Пиковая мощность солнечной батареи находится в точке, составляющей 90% от величины тока

короткого замыкания. При нахождении этой точки, солнечную батарею замыкают накоротко, затем ток модуля принимает заданное значение. При упоминаемых манипуляциях необходим мощный резистор, способный выдержать ток короткого замыкания. Солнечная батарея должна быть закорочена, когда значение тока короткого замыкания продолжает меняться с изменением инсоляции.

**Таблица 1. Сравнительная характеристика основных методов МРРТ**

Метод	КПД, %
P&Q	91,4
IncCond	94,6
Constant Voltage	96
Short - Circuit	96
Parasitic capacitances	99,8

Наибольшим КПД обладает метод паразитной ёмкости. Поэтому его применение является наиболее эффективным способом определения точки максимальной мощности.

Для дальнейшего выбора контроллера заряда МРРТ будет необходимо определить напряжение контроллера по формуле:

$$U_{MPPT} = 1,2 \cdot U_{ХХ \text{ ФЭП}},$$

где  $U_{ХХ \text{ ФЭП}}$  – напряжение холостого хода фотоэлектрической панели, В.



**Рисунок 7. Контроллер заряда EPsolar**

Большинство выпускаемых солнечных батарей имеет номинальное напряжение 12В или 24В [11]. Подобное исполнение позволяет обеспечивать зарядку аккумуляторных батарей без дополнительного преобразования напряжения. Заметим, что аккумуляторные батареи появились значительно раньше солнечных батарей и имеют распространённый стандарт номинального напряжения 12В или 24В. Следовательно, большая часть контроллеров для солнечных батарей выпускается с номинальным рабочим напряжением равным 12В, 24В или с автоматическим распознаванием и переключением напряжения.

Номинальное напряжение, упомянутое выше, достаточно низкое для мощных систем. Для получения желаемой мощности зачастую приходится увеличивать количество ФЭП и аккумуляторов, соединяя их в параллельные контуры и значительно увеличивая силу тока. Увеличение силы тока, в свою очередь, ведет к нагреву кабеля и электрическим потерям. Требуется увеличивать толщину кабеля, а это повышает расход металла.

Контроллеры, рассчитанные на высокий ток, получаются очень дорогими. Чтобы исключить рост тока, контроллеры для мощных систем конструируют для номинально рабочего напряжения на 36В, 48В и 60В.

Заметим, что напряжение контроллеров кратно по напряжению 12 вольтам, чтобы можно было подключать ФЭП и аккумуляторные батареи в последовательные сборки.

В заключение необходимо в очередной раз отметить особую важность развития smart технологий. Посредством автоматизации энергораспределения возможно добиться существенной экономии ресурсов. Применение гибридных автономных энергогенерирующих станций на базе ВИЭ способно обеспечить электроэнергией даже самые отдаленные и изолированные от единой энергосистемы регионы. Существенную роль в успешном использовании smart технологий играют методики определения параметров микроэнергосистемы. В связи с чем совершенствование алгоритмов расчета различных параметров – одна из важнейших задач.

#### Литература:

1. Глава Минприроды рассказал, когда в России закончатся нефть и газ // РБК; URL: <https://www.rbc.ru/business/11/05/2021/609971fe9a7947e065f63cd4> (Дата обращения 13.11.2022)
2. Балаев П.А., Сивеев Т.М., Груздов А.Г., Пашковская Е.Е. Интеллектуальные технологии управления и автоматизации в энергосистеме // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2022. – Т.7.
3. This Is How Much Potential Solar Power Has // businessinsider; URL: <https://www.businessinsider.com/this-is-the-potential-of-solar-power-2015-9> (Дата обращения 16.11.2022)
4. Таблицы солнечной энергии и инсоляции в регионах России // realsolar; URL: <https://realsolar.ru/article/solnechnye-batarei/kolichestvo-solnechnoy-energii-v-regionah-rossii/> (Дата обращения 13.11.2022)
5. Использование солнечной энергетики за рубежом // URL: <https://econrj.ru/stati/solnechnie-jelektrostantsii-i-vsjo-s-nimi->

- [svjazannoe/ispolzovanie-solnechnoj-jenergetiki-za-rubezhom.html](http://svjazannoe/ispolzovanie-solnechnoj-jenergetiki-za-rubezhom.html) (Дата обращения 16.11.2022)
6. МРРТ-контроллер: принцип действия, как работает, обзор // [elektrik.info](http://elektrik.info); URL: <http://elektrik.info/main/energy/1546-mppt-kontroller-dlya-zaryada-solnechnyh-batarey.html> (Дата обращения 13.11.2022)
  7. Мухамбедьяров Б.Б., Лукичев Д.В., Полюга Н.Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т.18 – №6. – С.1099.
  8. Куркова О.П. МРРТ-алгоритм управления частотными характеристиками как инструмент повышения энергоэффективности процесса бесконтактной магнитно-резонансной зарядки электротранспорта // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – №4. – С.99-124.
  9. Русскин В.А., Семёнов С.М., Диксон Роберт Кристофер. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т.327. – №4. – С.78-87
  10. Modified Algorithm for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems // URL: <https://hub.exponenta.ru/post/modified-algorithm-for-maximum-power-point-tracking-in-photovoltaic-systems949>
  11. Как подобрать контроллер заряда солнечных батарей // URL: <http://www.altcentr.ru/blogs/819-kak-podobrat-kontroller-zaryada-solnechnykh-batarey/> (Дата обращения 16.11.2022)

#### Literature:

1. The head of the Ministry of Natural Resources told when Russia will run out of oil and gas // RBC; URL: <https://www.rbc.ru/business/11/05/2021/609971fe9a7947e065f63cd4> (Accessed 13.11.2022)

2. Balaev P.A., Siveev T.M., Gruzdov A.G., Pashkovskaya E.E. Intelligent control and automation technologies in the power system // International Journal of Information Technologies and Energy Efficiency. – 2022. – Vol.7.
3. This Is How Much Potential Solar Power Has // businessinsider; URL: <https://www.businessinsider.com/this-is-the-potential-of-solar-power-2015-9> (Accessed 16.11.2022)
4. Tables of solar energy and insolation in the regions of Russia // realsolar; URL: <https://realsolar.ru/article/solnechnye-batarei/kolichestvo-solnechnoy-energii-v-regionah-rossii/> (Accessed 13.11.2022)
5. The use of solar energy abroad // URL: <https://econrj.ru/stati/solnechnie-jelektrostantsii-i-vsjo-s-nimi-svjazannoe/ispolzovanie-solnechnoj-jenergetiki-za-rubezhom.html> (Accessed 16.11.2022)
6. MPPT controller: operating principle, how it works, overview // elektrik.info ; URL: <http://elektrik.info/main/energy/1546-mppt-kontroller-dlya-zaryada-solnechnyh-batarey.html> (Accessed 13.11.2022)
7. Mukhambedyarov B.B., Lukichev D.V., Polyuga N.L. Investigation of algorithms for finding the maximum power point to increase the efficiency of photovoltaic converters // Scientific and Technical Bulletin of information technologies, Mechanics and optics. – 2018. – Vol.18 – No. 6. – p.1099.
8. Kurkova O.P. MPPT-frequency response control algorithm as a tool for improving the energy efficiency of the process of contactless magnetic resonance charging of electric vehicles // Control, communication and security systems. - 2021. – No. 4. – pp.99-124.
9. Russkin V.A., Semenov S.M., Dixon Robert Christopher. Investigation of algorithms for finding the maximum power point for a step-up voltage converter of a solar inverter // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. - 2016. – Vol.327. – No. 4. – p.78-87
10. Modified Algorithm for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems // URL: <https://hub.exponenta.ru/post/modified-algorithm-for-maximum-power-point-tracking-in-photovoltaic-systems949>

11. How to choose a solar battery charge controller // URL:  
<http://www.altcentr.ru/blogs/819-kak-podobrat-kontroller-zaryada-solnechnykh-batarey/> / (Accessed 16.11.2022)

© Балаев П.А., Сивеев Т.М., Груздов А.Г., Пашковская Е.Е., Научный сетевой журнал «Столпыпинский вестник», номер 9/2022.

**Для цитирования:** Балаев П.А., Сивеев Т.М., Груздов А.Г., Пашковская Е.Е. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ // Научный сетевой журнал «Столпыпинский вестник», номер 9/2022.