



Научная статья

УДК 620.92, 621.311.24

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187454>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LQGTNX>

## АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Хайдер Альхуссейни<sup>1</sup>, Лайт Мохаммед Абдали<sup>1</sup>,

В.В. Кувшинов<sup>2</sup>, Е.В. Гусева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет Куфы, г. Наджаф, Ирак

<sup>2</sup>Севастопольский Государственный Университет, г. Севастополь, Россия

✉ [kuvshinov.vladimir@gmail.com](mailto:kuvshinov.vladimir@gmail.com)

---

**Цитирование:** Альхуссейни Х., Абдали Л.М., Кувшинов В.В., Гусева Е.В. Анализ использования различных методов отслеживания точки максимальной мощности для фотоэлектрических систем // Труды МАИ. 2026. № 146. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187454>

---

**Аннотация.** Фотоэлектрические системы всё чаще используются в качестве экологически чистого и устойчивого источника энергии. Однако их эффективность существенно зависит от условий окружающей среды, таких как солнечное излучение и температура. Для обеспечения максимального извлечения энергии из фотоэлектрических панелей используются методы отслеживания точки максимальной мощности. В представленной работе рассматривается концепция отслеживания мощности для фотоэлектрических систем, а также представлен обзор и классификация нескольких методов отслеживания точки максимальной мощности (MPPT), описанных в литературе. В данной работе представлена новая классификация алгоритмов MPPT, которая применяется в соответствии с очередностью выполнения процессов. Основные разделы работы организованы следующим образом. В первом разделе представлен анализ использования возобновляемых источников энергии, в том числе солнечной электроэнергетики, во втором разделе описаны характеристики фотоэлектрических генераторов, в третьем разделе представлен принцип работы

системы МРРТ, в четвертом разделе обсуждается классификация методов МРРТ. В заключении проводилось обсуждение результатов, а в выводах представлена сравнительная таблица для обзора методов. Результаты, полученные в этой работе, могут быть полезны, как для традиционной энергетики, так и для альтернативных способов преобразования энергии. Фотоэлектрические преобразователи и модули на их основе являются основным источником энергии для орбитальных космических станций и другой аэрокосмической техники.


Использование предложенных в работе методов отслеживания точки максимальной мощности при работе солнечных батарей позволяет значительно сократить потери, улучшить качество используемой электрической энергии, а также повысить эффективность использования уже преобразованной электрической энергии. Предложенные методы могут быть использованы также и в наземных фотоэлектрических системах, обеспечивающих авиационные и другие промышленные предприятия, а также могут найти применение для удалённых объектов крайнего севера Российской Федерации и в других труднодоступных районах.

**Ключевые слова:** точка максимальной мощности (MPPT), фотоэлектрическая (PV) генерация, солнечная радиация, температура, DC-DC преобразователь

---

## REVIEW OF THE USE OF DIFFERENT MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHODS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Haider Alhusseini<sup>1</sup>, Layth Mohammed Abdali<sup>1</sup>,

V.V. Kuvshinov<sup>2</sup>, E.V. Guseva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Kufa, Najaf, Iraq

<sup>2</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

✉ [kuvshinov.vladimir@gmail.com](mailto:kuvshinov.vladimir@gmail.com)

---

**Citation:** Alhusseini H., Abdali L.M., Kuvshinov V.V., Guseva E.V. Review of the use of different maximum power point tracking methods for photovoltaic systems // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187454>

---

**Abstract.** Photovoltaic systems are progressively utilized as an eco-friendly and sustainable energy source. Nonetheless, their efficacy is substantially contingent upon environmental factors, including sun radiation and temperature. Maximum Power Point Tracking (MPPT) methodologies are employed to optimize energy extraction from solar panels. This article examines the notion of power tracking in photovoltaic systems and offers an overview and categorization of several maximum power point tracking (MPPT) approaches documented in the literature. In conclusion, a comparative table is provided providing an overview of the methodologies. The presented paper examines the concept of power point tracking for photovoltaic systems and provides a review and classification of several maximum power point tracking (MPPT) methods described in the literature. This paper presents a new classification of MPPT algorithms, which is applied according to the order of process execution. The main sections of the paper are organized as follows. The first section presents an analysis of the use of renewable energy sources, including solar power, the second section describes the characteristics of photovoltaic generators, the third section presents the working principle of the MPPT system, and the fourth section discusses the classification of MPPT methods. Finally, a discussion of the results was provided, and the conclusions presented a comparative table for an overview of the methods. The results obtained in this study may be useful for both traditional energy and alternative energy conversion methods. Photovoltaic converters and modules based on them are the primary energy source for orbital space stations and other aerospace applications. The use of the methods proposed in this work for tracking the maximum power point during solar panel operation allows for a significant reduction in losses, improvement in the quality of electrical energy used, and an increase in the efficiency of using already converted electrical energy.

The proposed methods can also be used in ground-based photovoltaic systems that supply aviation and other industrial enterprises and can also find application in remote areas of the far north of the Russian Federation and other hard-to-reach areas.

**Keywords:** maximum power point tracking (MPPT), photovoltaic (PV), solar radiation, temperature, DC-DC converter

---

## Введение

В настоящее время преобразователи потока солнечной радиации в электрическую энергию используются практически в большинстве стран мира и во многих отраслях энергетики, промышленности и транспорта. Особенно значительный вклад в обеспечение электрической энергией вносят фотоэлектрические системы энергоснабжения, которые используются для обеспечения различного основного и вспомогательного оборудования наземного и космического назначения. Основная проблема солнечных станций — это недостаточная выходная мощность электрического преобразования на единицу рабочей поверхности модулей. Следовательно, энергетические потери при работе фотоэлектрических систем могут иметь значительные последствия. Сокращение потерь при выработке электрической энергии является одной из основных задач солнечной электроэнергетики, особенно для обеспечения авиационно-космической техники. Особенно важную роль играют системы управления режимами работы фотоэлектрических систем. Для достижения оптимального режима основную роль играют методы отслеживания точки максимальной мощности (MPPT). В представленной работе рассмотрены и проанализированы различные методы управления MPPT при выработке электрической энергии солнечным генератором.

Потребление энергии растёт во всех регионах мира в связи с демографическим развитием и индустриализацией. В настоящее время большая часть электроэнергии производится на основе традиционных, не возобновляемых ресурсов, таких как уголь, природный газ и нефть, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду [1]. Поэтому необходимо развитие чистых и возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, энергия ветра, биоэнергия и т. д., поскольку возобновляемые источники энергии неисчерпаемы, в отличие от не возобновляемых источников, запасы которых со временем уменьшаются. Возобновляемые источники энергии по-прежнему экологичны и способствуют сокращению выбросов CO<sub>2</sub>. Кроме того, их можно производить в небольших масштабах или локально. В настоящее время использование солнечной и ветровой энергии демонстрирует более высокий рост.

Однако, сравнивая преимущества этих двух видов источников энергии, можно заметить, что фотоэлектрическая энергия предпочтительнее ветровой, поскольку её ежедневная выработка практически равномерна, в то время как ветровая турбина работает нестабильно из-за ветра. Кроме того, генератор не содержит движущихся частей, поэтому текущие эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание относительно ниже [2]. Солнечная энергия имеет множество применений и более гибка, поэтому она более полезна. Для обеспечения оптимальной передачи энергии к фотоэлектрическому генератору подключается различное оборудование. Вырабатываемая мощность зависит от температуры, освещённости и нагрузки. Поэтому для обеспечения максимальной мощности фотоэлектрического генератора необходимо реализовать алгоритм МРРТ [3].

### **Принцип работы системы МРРТ**

Отслеживание точки максимальной мощности играет очень важную роль в фотоэлектрических системах (ФЭС) и считается важной темой для исследователей. Задача заключается в модификации интерфейсов питания, что позволяет добиться совпадения рабочих характеристик генерации и потребления на идеальном уровне с точки зрения генерации [4]. Кроме того, алгоритмы отслеживания точки максимальной мощности должны использоваться с фотоэлектрическими элементами (ФЭ) для извлечения полной мощности в различных климатических условиях [5][6][7][8].

По сути, метод МРРТ представляет собой систему управления мощностью, которая подает соответствующий рабочий цикл (D) на систему преобразования фотоэлектрической энергии (DC-DC-преобразователь), как показано на рисунке 1, на основе входных данных фотоэлектрического модуля для непрерывного достижения максимальной выработки энергии, тем самым достигая максимальной мощности и обеспечивая стабильное напряжение при изменяющихся погодных условиях. В целом, существует несколько ключевых вопросов при разработке наилучшего метода МРРТ для ФЭ-системы, включая

стоимость, эффективность, потери энергии, время отслеживания, уровень колебаний, точное отслеживание MPP и тип реализации [9][10].

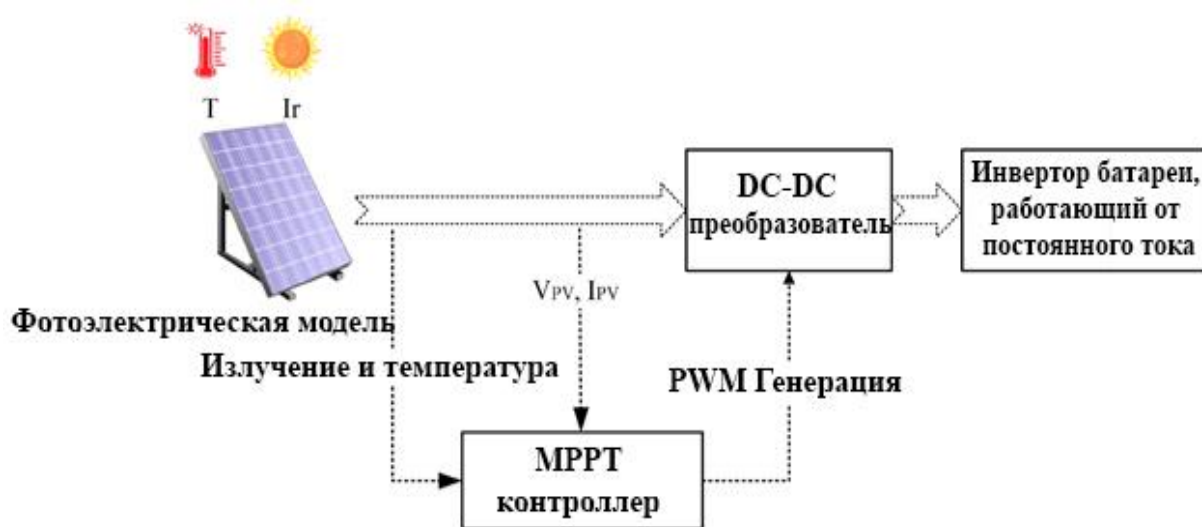


Рисунок 1 - Система MPPT с DC-DC-преобразователем

### Классификация алгоритмов MPPT

Установка рабочей точки фотоэлектрического элемента в точке максимальной мощности имеет решающее значение для фотоэлектрической системы. Выбор оптимального алгоритма для создания фотоэлектрической системы может быть сложным из-за наличия множества доступных подходов. Требования к алгоритмам различаются, включая сложность, количество датчиков, цифровую или аналоговую реализацию, скорость сходимости, точность отслеживания и экономическую эффективность [11]. В этом разделе классификация алгоритмов MPPT основана на методах отслеживания, которые разделены на 5 групп, как показано на рисунке 2:

- Методы отслеживания с постоянными параметрами: Основанные на этом методе отслеживания, используют predetermined фиксированные значения, характеризующие MPP.
- Методы отслеживания с измерением и сравнением: Этот метод основан на измерении внешних параметров (напряжение фотоэлектрического элемента, ток, освещённость или температура) и сравнении их с заранее известным MPP.

- Методы отслеживания методом проб и ошибок: Эти методы используют попытку расчёта и наблюдение за полученным результатом, который определяет критерии направления для следующей попытки достижения МРР.
- Методы отслеживания с математическими и расчетными функциями: эти методы определяют местоположение МРР на основе математических расчетов, имеющихся данных с использованием уравнений.
- Методы отслеживания с интеллектуальным прогнозированием: эти методы используют интеллектуальный процесс обучения, который позволяет прогнозировать местоположение МРР.

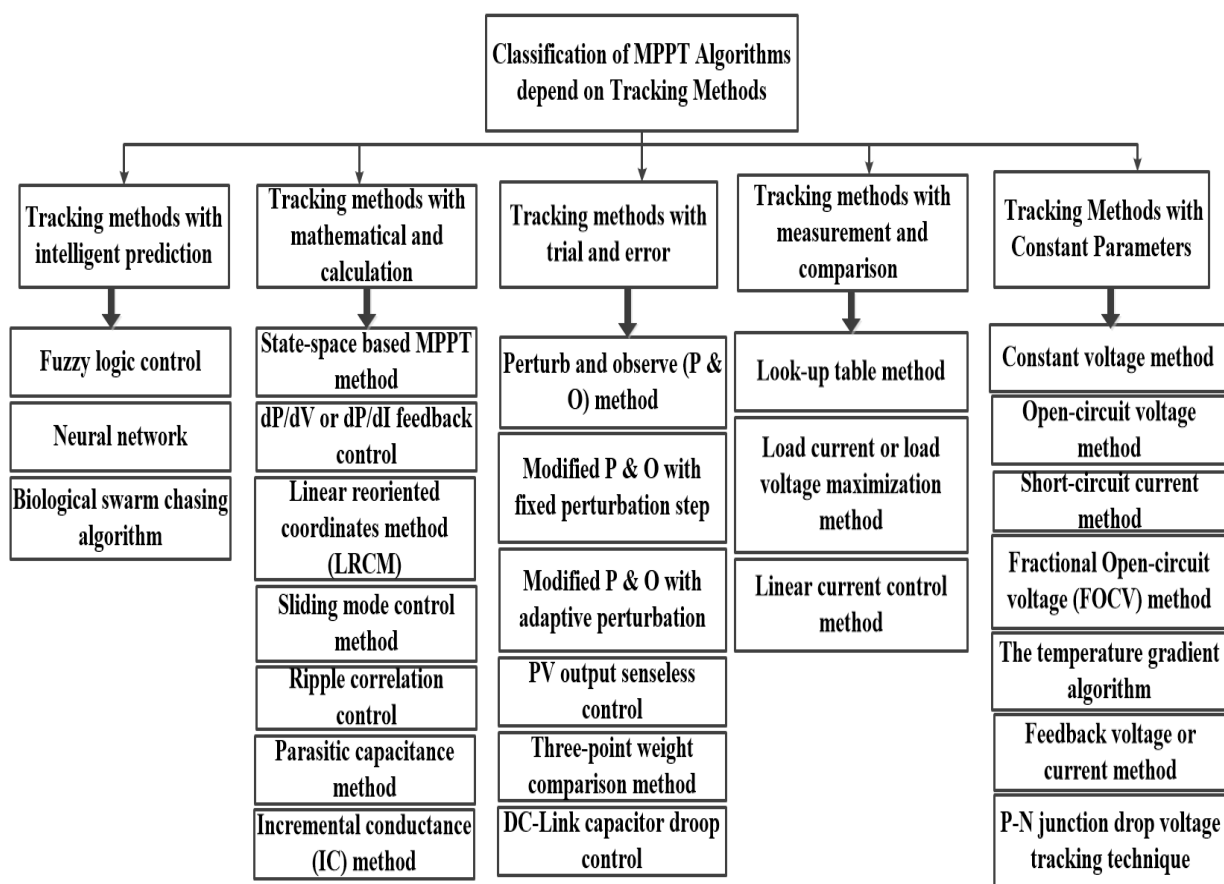


Рисунок 2 - Классификация алгоритмов МРРТ

### Методы отслеживания с постоянными параметрами

#### Метод постоянного напряжения (CV)

Метод CV — это простейший алгоритм МРРТ для фотоэлектрической системы, поскольку он не требует входного датчика для определения МРР. Этот алгоритм предполагает, что изменения параметров фотоэлектрической панели, такие как освещённость и температура, а также погодные условия,

незначительны, и что постоянное опорное напряжение ( $V_{ref}$ ) достаточно для достижения характеристик, близких к МРР, как показано в уравнении (1):

$$V_{ref} = K * V_{oc} \quad (1)$$

где  $V_{oc}$  — напряжение холостого хода фотоэлектрической батареи, а  $k$  — постоянное значение в диапазоне от 0,71 до 0,78, которое корректируется в соответствии с характеристиками и погодными условиями установленной фотоэлектрической батареи. Алгоритм постоянного напряжения (CV), также называемый «алгоритмом наилучшего фиксированного напряжения», является наиболее простым подходом к управлению МРРТ (рисунок 3). Для поддержания рабочей точки фотоэлектрического модуля вблизи точки максимальной мощности напряжение фотоэлектрического модуля регулируется и согласуется с заданным опорным напряжением, равным  $V_{MPP}$  фотоэлектрического модуля. Алгоритм CV, показанный на рисунках 3 и 4, игнорирует влияние освещённости и температуры на модуль и предполагает, что постоянное опорное напряжение точно соответствует истинной точке максимальной мощности.

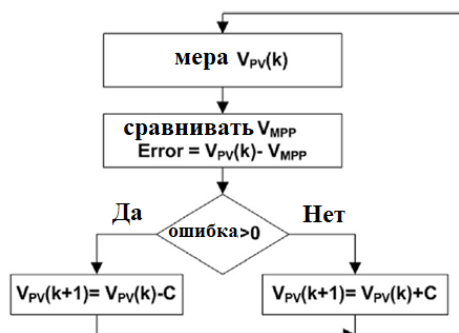


Рисунок 3 - Блок-схема метода постоянного напряжения

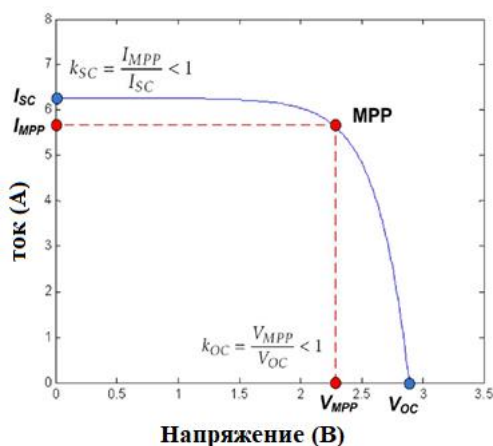


Рисунок 4 - Соотношение между  $I_{MPP}$  и  $I_{SC}$ , а также  $V_{MPP}$  и  $V_{OC}$

В результате рабочая точка не идеально совпадает с точкой максимальной мощности, что требует использования опорного напряжения для различных географических местоположений [11].

### Метод напряжения холостого хода (OCV)

Напряжение холостого хода (VOC) примерно линейно пропорционально выходному напряжению фотоэлектрической системы в точке максимальной мощности (MPP), что делает этот подход осуществимым. Соотношение представлено в уравнении (2), где коэффициент пропорциональности (kOC) в основном зависит от климата, технологии фотоэлектрических элементов и коэффициента заполнения фотоэлектрической системы.

$$VMPP = kOC VOC (kOC < 1) \quad (2)$$

Блок-схема на рисунке 5 может быть использована для реализации этого соотношения.

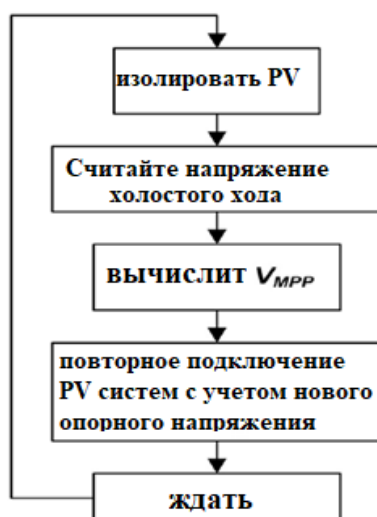


Рисунок 5 - Алгоритм напряжения холостого хода

Напряжение холостого хода измеряется путем периодического прерывания системы. Затем рабочее напряжение корректируется до идеальной точки напряжения, а максимальный пиковый момент (MPP) обновляется с использованием соотношения, приведенного в уравнении (7). Несмотря на кажущуюся простоту этой стратегии, выбор идеального значения константы k является сложной задачей. Тем не менее, в литературе [12], [13], [14] приводятся значения kOC от 0,73 до 0,80. Напряжение холостого хода (VOC), которое служит опорным напряжением, выбирается как фиксированная доля и остается

постоянным в широком диапазоне климатических условий. Выбор этой пропорции с учетом фактического соотношения между VMPP и VOC определяет, насколько точно рабочее напряжение соответствует максимальному напряжению, или VMPP, в результате извлекаемая мощность не оптимизируется.

### Метод отслеживания тока короткого замыкания (SCC)

Этот подход к отслеживанию, как и метод отслеживания холостого хода, основан на линейной зависимости между током фотоэлектрической системы в точке максимальной мощности (MPP) и током короткого замыкания, как показано в уравнении (3).

$$I_{MPP} = k_{SC} I_{SC} (k_{SC} < 1) \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности, как и в предыдущем методе, в основном определяется технологией фотоэлектрических элементов, метеорологическими условиями и коэффициентом заполнения. Поликристаллические фотоэлектрические модули обычно имеют константу  $k_{SC}$ , составляющую приблизительно 0,85 [15], [16]. Обычно  $k$  измеряется путем сканирования фотоэлектрической системы каждые несколько минут. После получения  $k_{SC}$  система сохраняет оценку, полученную по уравнению (9), до следующего расчета  $k_{SC}$ . На рисунке 6 показана блок-схема управления, которая сопоставима с подходом, основанным на напряжении холостого хода. Эта стратегия имеет те же преимущества и недостатки, что и ранее рассмотренный метод управления.

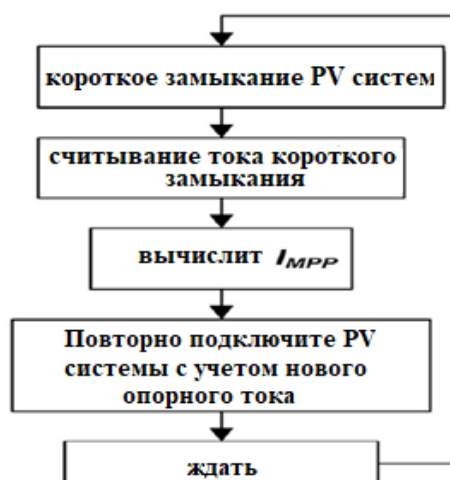


Рисунок 6 - Алгоритм тока короткого замыкания

## Алгоритм температурного градиента (TG)

Уравнение характеристики фотоэлектрического элемента (уравнение (4)) указывает на линейную зависимость между температурой ячейки и напряжением холостого хода (OCV). Согласно [17], эта зависимость выглядит следующим образом:  $VOC_{STC}$  — напряжение холостого хода в стандартных температурных условиях (STC),  $T$  — фактическая температура,  $T_{STC}$  — температура при STC, а  $dVOC/dT$  — температурный градиент. Напряжение холостого хода (VOC) вычисляется путем измерения фактической температуры ( $T$ ), а MPP отслеживается с использованием того же уравнения (3), что и для метода напряжения холостого хода, который подразумевает отключение панели для измерения напряжения.

$$VOC = VOC_{stc} + (T - T_{stc}) dVOC / dT \quad (4)$$

## Метод обратной связи по напряжению или току (FBV или FBC)

Этот метод сопоставим с методом постоянного напряжения. Для поддержания постоянного напряжения (тока) используется базовая система управления [18]. Для управления фотоэлектрической панелью в заданной рабочей точке вблизи точки максимальной мощности (MPP) рабочий цикл (D) DC/DC-преобразователя непрерывно корректируется на основе разницы между напряжением (током) фотоэлектрической панели и постоянным напряжением (током). Этот подход экономически эффективен и прост, поскольку использует только один контур обратной связи для управления. Однако он не позволяет адаптироваться к изменяющимся погодным условиям.

## Метод отслеживания падения напряжения на p-n-переходе

Этот подход также известен как «Excellent Operating Point Tracker» (отслеживание превосходной рабочей точки). Фотоэлементы и диодные p-n-переходы имеют сопоставимые температурные характеристики. Диоды, установленные на задней стороне фотоэлектрических панелей, регистрируют изменения температуры поверхности по падению напряжения на p-n-переходе, которое служит опорным напряжением для трекера [19]. Опорное напряжение  $V_r$  представлено с помощью упрощенной схемы на рисунке 7 следующим образом:

$$V_r = k_2 (V_s - V_{ref}) = k_2 (V_s - k_1 V_d) \quad (5)$$

$V_s$  — выходное напряжение фотоэлектрического модуля,  $V_{ref}$  — опорное напряжение (полученное из усиленного прямого падения напряжения на p-n-переходе), а  $V_d$  — коэффициент усиления усилителей Amp1 и Amp2. Этот метод измеряет только температуру и игнорирует освещённость, что приводит к неточной стратегии отслеживания.

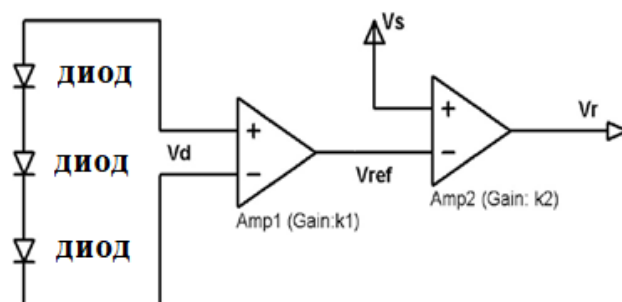


Рисунок 7 - Конфигурация схемы управления трекера постоянного напряжения

## Методы отслеживания измерением и сравнением

### Метод таблицы поиска

В основе этого метода лежит сравнение предварительно сохранённых значений каждого потенциального климатического состояния с фактическими. Системный контроллер рассчитывает новое рабочее напряжение (VMPP) на каждом цикле, сравнивая зарегистрированные значения температуры и освещённости с базой данных, хранящейся в справочной таблице [20]. Справочная таблица формируется на основе математического моделирования фотоэлектрического модуля, спецификаций производителя или экспериментальных испытаний фотоэлектрического модуля в различных климатических условиях. В результате системе требуется большой объём оперативной памяти для хранения базы данных всех потенциальных входных данных.

### Метод максимизации тока или напряжения нагрузки

Оптимизация мощности фотоэлектрических систем также максимизирует выходную мощность нагрузки, когда фотоэлектрический модуль подключен к преобразователю мощности. С другой стороны, если преобразователь не имеет потерь, увеличение его выходной мощности оптимизирует мощность

фотоэлектрических систем. Отмечено, что большинство нагрузок являются резистивными, источниками напряжения, источниками тока или их смесью. Чтобы получить наибольшую выходную мощность для нагрузки типа источника напряжения, ток нагрузки  $I_{out}$  должен быть максимизирован. Важно максимизировать напряжение нагрузки  $V_{out}$  для нагрузки типа источника тока. К другим типам нагрузок можно применять как  $V_{out}$ , так и  $I_{out}$ . В результате требуется только один датчик. Следовательно, чтобы максимизировать мощность практически всех типов нагрузок, достаточно максимизировать либо напряжение нагрузки, либо ток нагрузки. Большинство фотоэлектрических систем используют аккумуляторную батарею либо в качестве основной, либо в качестве резервной нагрузки, а преобразователь мощности управляется положительной обратной связью для максимизации тока нагрузки и поддержания работы фотоэлектрического модуля вблизи точки максимальной мощности (МРР). Ниже рассматривается другой подход, известный как «единственно текущий фотоэлектрический метод», основанный на этом. Поскольку этот метод МРРТ основан на идее отсутствия потерь в преобразователе энергии, точная работа в точке максимальной мощности (МРР) редко достигается [21], [22], [23].

### Методы отслеживания методом проб и ошибок

#### Метод «возмущения и наблюдения» (P&O)

Традиционный алгоритм P&O-MРРТ широко используется благодаря своей простоте и лёгкости реализации, как показано на блок-схеме на рисунке 9.

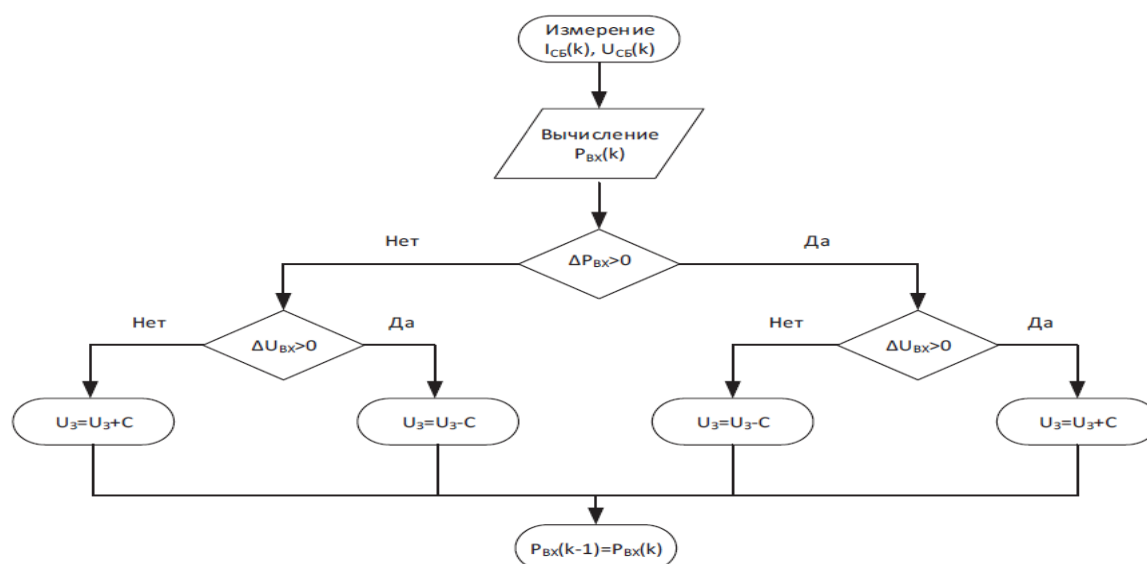


Рисунок 9 - Условная блок-схема алгоритма P&O

Алгоритм измеряет напряжение и ток для фотоэлектрической панели, а затем рассчитывает выходную мощность фотоэлектрической панели. Более того, алгоритм сравнивает мощность и напряжение для фотоэлектрической панели в текущий момент ( $K$ ) с предыдущим моментом времени ( $K-1$ ) и прогнозирует время достижения точки максимальной мощности MPP [24]. Таким образом, мощность фотоэлектрической панели будет сильнее зависеть от любого небольшого возмущения напряжения. Если изменение мощности фотоэлектрической панели положительное, это будет создавать возмущение напряжения в том же направлении; в противном случае возмущение напряжения уменьшается для достижения MPP. Таблица 1 поясняет краткий обзор работы алгоритма P&O-MPPT [25].

Таблица 1

Итоговая работа алгоритма P&O

Возмущение	Дельта P	Результат возмущения
+ Ve	+ Ve	+ Ve
+ Ve	- Ve	- Ve
- Ve	+ Ve	- Ve
- Ve	- Ve	+ Ve

Кроме того, рабочий цикл повышающего DC-DC преобразователя изменяется, и процесс периодически повторяется до достижения MPP. Колебания будут продолжаться около MPP. Колебания можно уменьшить, используя малый размер шага, но отслеживание будет медленным для достижения точки максимальной мощности, а при большом значении размера шага колебания будут увеличиваться около MPP, но отслеживание будет более быстрым для достижения MPP [26].

#### **Модифицированный метод P&O с фиксированным шагом возмущения (MP&O-FP)**

В этом методе в качестве возмущающего сигнала используется коэффициент заполнения преобразователя вместо напряжения модуля. Это позволяет напрямую управлять коэффициентом заполнения преобразователя и упрощает процедуру управления, устраняя необходимость в ПИ/гистерезисном регуляторе после блока MPPT. Поскольку шаг возмущения фиксирован и зависит от

разработчика, проблема компромисса, рассмотренная ранее, по-прежнему актуальна. Модифицированная блок-схема шага P&O с фиксированным шагом возмущения представлена на рисунке 10. Вместо использования фиксированных значений, используемых в традиционном подходе P&O, для повышения эффективности методов P&O используется адаптивный расчет значения возмущения [27].

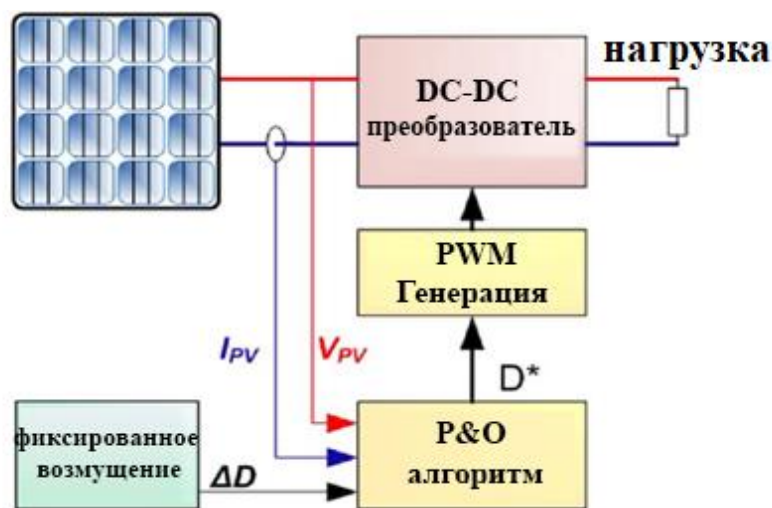


Рисунок 10 - Модифицированный P&O с фиксированным шагом возмущения

### Без сенсорное управление выходной мощностью фотоэлектрических систем (POS)

Алгоритм без сенсорного управления выходной мощностью фотоэлектрических систем (POS) в основном используется в очень больших солнечных системах, где входным сигналом системы управления является только ток нагрузки (рисунок 11).

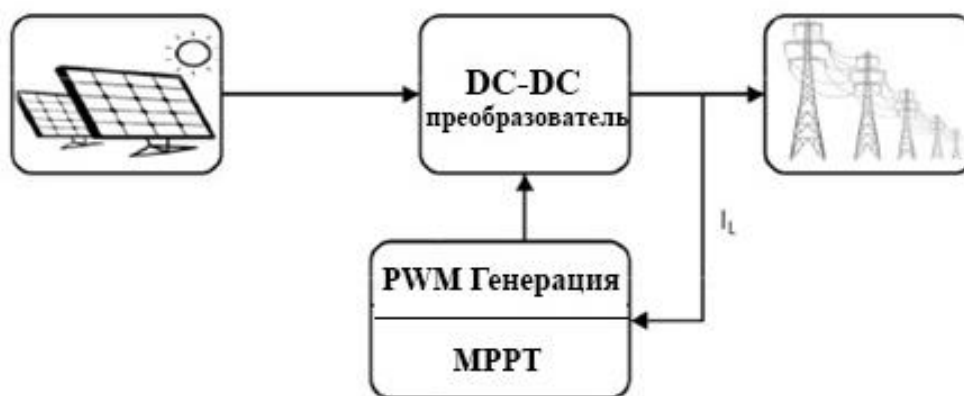


Рисунок 11 - Блок-схема POS

Крупномасштабные фотоэлектрические системы будут работать более эффективно и безопасно, чем при использовании традиционного метода управления. Наибольшая мощность может быть получена при достижении максимального тока, поскольку потери напряжения на нагрузке в больших солнечных системах минимальны. Аналогично, получение наибольшей мощности от фотоэлектрических батарей подразумевает получение максимальной мощности от нагрузки [28][29]. Мощность нагрузки определяется как очевидный побочный продукт напряжения и тока на клеммах нагрузки. Ток нагрузки и выходная мощность батарей могут быть связаны на основе упомянутых выше принципов.

Следовательно, фотоэлектрические электростанции могут использовать эту простую систему управления по доступной цене [30], [31]. Согласно общей схеме работы фотоэлектрических систем, увеличение рабочего цикла приводит к увеличению как выходного тока, так и тока нагрузки. Рабочее время и ШИМ-управление могут быть использованы для автоматизации процесса управления POS, что в конечном итоге приведет к снижению стоимости системы управления. Поскольку нет необходимости в обратной связи, а изменения напряжения минимальны, более крупная система выигрывает от повышенной эффективности и производительности этой системы управления.

### **Метод трёхточечного сравнения веса**

Периодически применяется метод трёхточечного сравнения веса путем изменения напряжения на клеммах солнечной батареи и измерения выходной мощности фотоэлектрических установок в трёх различных точках на кривой напряжения-напряжения. Эти три точки: точка А, которая является рабочей точкой в данный момент; точка В, которая отклоняется от точки А; и точка С, которая отклоняется в противоположном направлении от точки В.

На рисунке 12 показаны девять возможных сценариев [32].

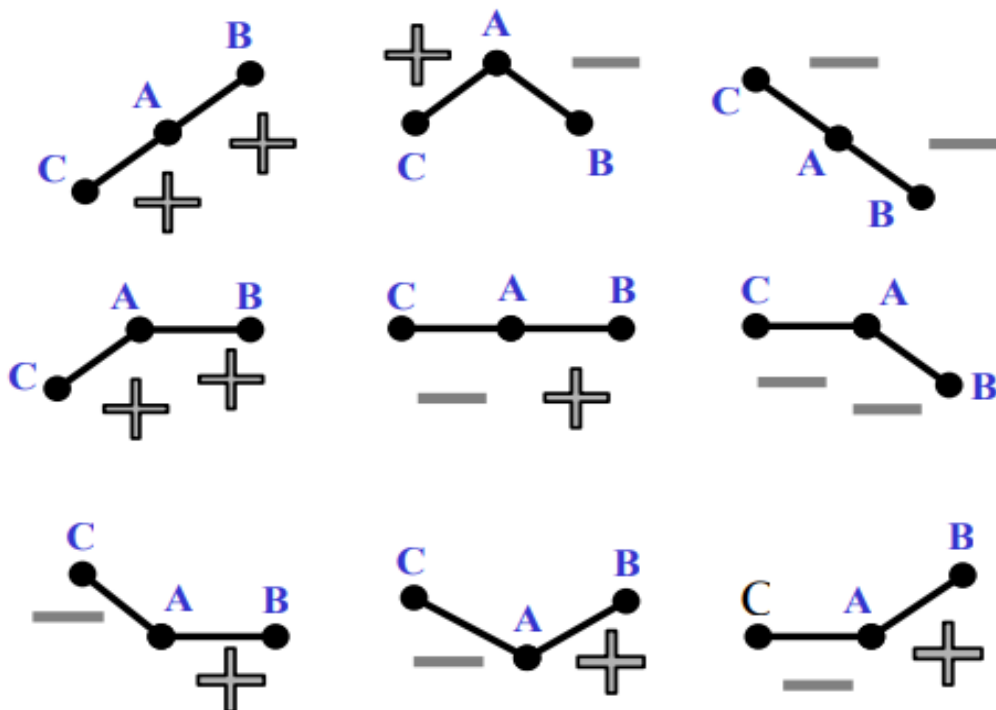


Рисунок 12 - Возможные состояния трёх точек возмущения

В этих ситуациях статусу присваивается положительный вес для точек А и В, если мощность точки В больше или равна мощности точки А. В противном случае статусу присваивается отрицательный вес. Кроме того, статусу присваивается положительный вес для точек А и С, если значение в точке С меньше значения в точке А. В противном случае статусу присваивается отрицательный вес. Коэффициент заполнения преобразователя должен увеличиваться, если два из трёх измеренных значений имеют положительный вес. И наоборот, коэффициент заполнения преобразователя должен уменьшаться, если два из них имеют отрицательный вес. В других случаях, когда достигается максимальная мощность (МРР) или происходит быстрое изменение солнечного излучения, коэффициент заполнения должен оставаться неизменным.

Блок-схема метода сравнения весов по трём точкам представлена на рисунке 13.

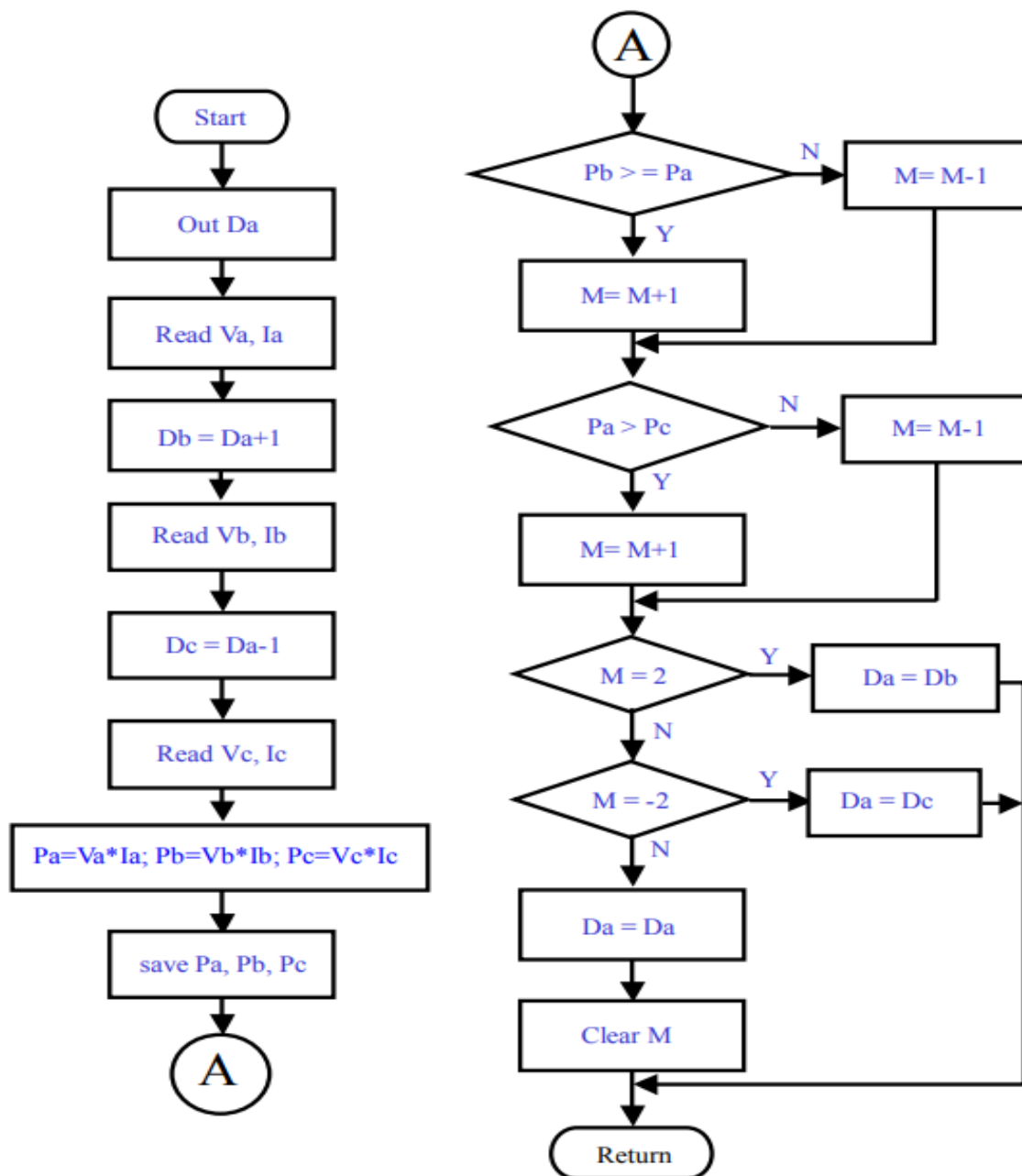


Рисунок 13 - Алгоритм трёхточечного сравнения весов

### Управление падением напряжения конденсатора звена постоянного тока

Этот метод специально разработан для работы с фотоэлектрической системой, имеющей каскадное соединение с инвертором переменного тока, как показано на рисунке 14 [33]. Выходное напряжение  $V_{link}$  и входное напряжение  $V_{PV}$  связаны следующим уравнением в случае повышающего преобразователя, подключенного между фотоэлектрической системой и системой переменного тока (6).

$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_{link}} \quad (6)$$

Определение падения напряжения на конденсаторе звена постоянного тока Vlink является основой управления подходами MPPT. Если предположить, что оно остаётся постоянным, увеличение тока инвертора увеличивает выходную мощность бустера, что, в свою очередь, увеличивает выходную мощность фотоэлектрического модуля. Пока потребности инвертора в мощности не превышают максимальную выходную мощность фотоэлектрического модуля, напряжение Vlink может поддерживаться на постоянном уровне.

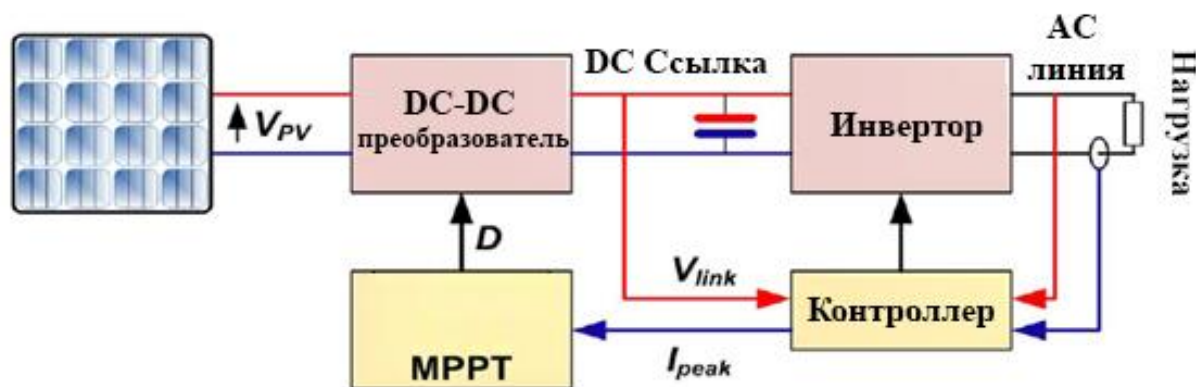


Рисунок 14 - Топология управления конденсатором постоянного тока [33]

Напряжение на конденсаторе Vlink начинает падать, когда мощность фотоэлектрического модуля превышает максимальное значение. Фотоэлектрический модуль работает на уровне MPP непосредственно перед этим, а команда управления током инвертора  $I_{Peak}$  достигает своего максимума. Чтобы предотвратить падение напряжения  $V_{link}$ , ток сети переменного тока поступает обратно, а диод  $D$  регулируется для максимального значения  $I_{Peak}$ .

## Методы отслеживания с использованием математических и расчетных методов

### Метод MPPT на основе пространства состояний (SS)

Фотоэлектрическая система моделируется в пространстве состояний с использованием уравнений пространства состояний, а для отслеживания точки максимальной мощности используется нелинейный динамический регулятор обратной связи, изменяющийся во времени. Фотоэлектрическая система должна быть представлена с помощью усредненного по времени переключателя. В связи

со структурной информацией системы и ограничениями на максимальную выдаваемую мощность предлагается нелинейный динамический регулятор обратной связи, изменяющийся во времени. Регулятор также может подавлять статические возмущения нагрузки и следовать за изменяющейся во времени опорной точкой MPP. Ключевыми компонентами точного отслеживания являются точные вычисления и производные [34]. Устойчивость и нечувствительность этого метода к изменениям параметров, продемонстрированные в исследованиях, являются одними из его преимуществ. В случае резких изменений погоды и частичного затенения он также может точно отслеживать MPP. В настоящее время нет экспериментальных доказательств решения какой-либо из этих проблем.

### **Управление с обратной связью $dP/dV$ или $dP/dI$**

Это простой вычислительный подход к мониторингу MPP. Этот метод использует цифровые сигнальные процессоры или микроконтроллеры для расчета наклона кривой мощности в зависимости от напряжения и тока ( $dP/dV$  и  $dP/dI$ ). Изменение этого параметра затем отслеживается и стремится к нулю через цепь обратной связи. Система управления должна изменять рабочий цикл для отслеживания MPP, как и другие алгоритмы, в соответствии со значениями этих параметров. Кроме того, этот метод может помочь увеличить время отклика системы при использовании переменного размера шага [35].

### **Метод управления скользящим режимом (SMC)**

Основным этапом этого подхода для отслеживания точки максимальной мощности является расчет производной мощности фотоэлектрической системы по напряжению. Из уравнения (7) можно сделать вывод, что  $S$  указывает положение рабочей точки (напряжения) относительно максимальной мощности (MPP).

$$S = \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV} \times I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (7)$$

В скользящем режиме для фотоэлектрических систем существуют два быстрых и медленных контура управления. Медленный контур (такой как P&O) использует напряжение и ток для уменьшения, установившегося сбоя, тогда как

быстрый контур (скользящий режим) использует температуру, напряжение и ток для приближения к точке максимальной мощности (МРР). Линейная комбинация напряжения, тока и мощности фотоэлектрического модуля в пространстве состояний будет передана на скользящую поверхность, которая включает в себя точку максимальной мощности (МРР) или близка к ней в системе управления со скользящим режимом. Они остаются на той же поверхности после достижения поверхности скольжения или точки максимальной мощности (МРР) [36]. Два основных преимущества управления со скользящим режимом заключаются в том, что неопределенности не влияют на отклики замкнутого контура, а оптимальные динамические отклики могут быть получены путем выбора подходящей скользящей функции [37]. Уравнения (8) и (9) определяют поверхность скольжения и закон управления скользящим режимом.

$$\sigma = i_L - 1.45v_{PV} - 0.455T + s_{ref} = 0 \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} u = 0, \text{ if } \sigma < 0 \rightarrow S \geq 0 \\ u = 0, \text{ if } \sigma > 0 \rightarrow S < 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

### Управление корреляцией пульсаций (RCC)

Солнечные батареи в системе будут испытывать пульсации напряжения и тока при переключении преобразователя, подключенного к батарее. Напряжение и ток системы (выходная мощность) испытывают пульсации в результате этого переключения. RCC отслеживает точку максимальной мощности, используя пульсации, которые создает преобразователь. Связь между мощностью и током или производными напряжения по времени используется для нахождения точки максимальной мощности. Когда производная мощности равна 0, создается МРР. Рабочая точка должна сместиться вправо ( $V < V_{MPP}$  или  $I < I_{MPP}$ ), если напряжение или ток ниже напряжения или тока в МРР. Это означает, что рабочая точка находится слева от МРР. Рабочая точка должна сместиться влево ( $V > V_{MPP}$  или  $I > I_{MPP}$ ), если напряжение или ток выше напряжения или тока в МРР. Это происходит потому, что рабочая точка находится справа от МРР. Может быть проще вычислить производные, измеряя напряжение индуктора, поскольку напряжение

и ток индуктора связаны. Потери в сердечнике или наличие сопротивления (неидеальность) в индукторе оказывают минимальное влияние, поскольку постоянная времени индуктора больше периода переключения преобразователя [38] [39].

### Метод инкрементальной проводимости (ИС)

В основе метода приращения проводимости (ИС) лежит дифференциация мощности фотоэлектрических установок по напряжению. Когда результат дифференцирования равен нулю, получается максимальная мощность (MPP) [40], [41], [42]. Точка мощности на вершине кривой определяется путём вычисления и сравнения двух фракций: приращения проводимости ( $dI_{PV}/dV_{PV}$ ) и проводимости ( $I_{PV}/V_{PV}$ ) (уравнения 10 и 11).

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (10)$$

что подразумевает, что:

$$\frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (11)$$

Другими словами, наблюдаемые значения  $V_{PV}$  и  $I_{PV}$  в различные моменты времени можно использовать для оценки приращений флуктуаций ( $dV_{PV}$  и  $dI_{PV}$ ) путём увеличения обоих параметров ( $\Delta V_{PV}$  и  $\Delta I_{PV}$ ). Ниже приведено выражение для этих параметров (12):

$$\begin{aligned} dV_{PV}(t_2) &\approx \Delta V_{PV}(t_2) = V_{PV}(t_2) - V_{PV}(t_1) \\ dI_{PV}(t_2) &\approx \Delta I_{PV}(t_2) = I_{PV}(t_2) - I_{PV}(t_1) \end{aligned} \quad (12)$$

Этот подход основан на наблюдении, что кривая мощности солнечной батареи имеет нулевой наклон, с положительным значением на левой стороне и отрицательным на правой, по мере достижения максимальной мощности (MPP). Ниже перечислены математические соотношения для ИС (13).

$$\begin{aligned} \frac{V_{PV}}{I_{PV}} &= -\frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \text{ at MPP} \\ \frac{V_{PV}}{I_{PV}} &< -\frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \text{ left to MPP} \\ \frac{V_{PV}}{I_{PV}} &> -\frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \text{ right to MPP} \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, как показано на блок-схеме на рисунке 15, МРР можно контролировать, сравнивая прирост проводимости ( $dI/dV$ ) с мгновенным значением проводимости ( $I/V$ ).  $V_{ref}$  — это опорное напряжение, при котором должен работать фотоэлектрический модуль.  $V_{ref}$  эквивалентное значение напряжения в точке МРР.

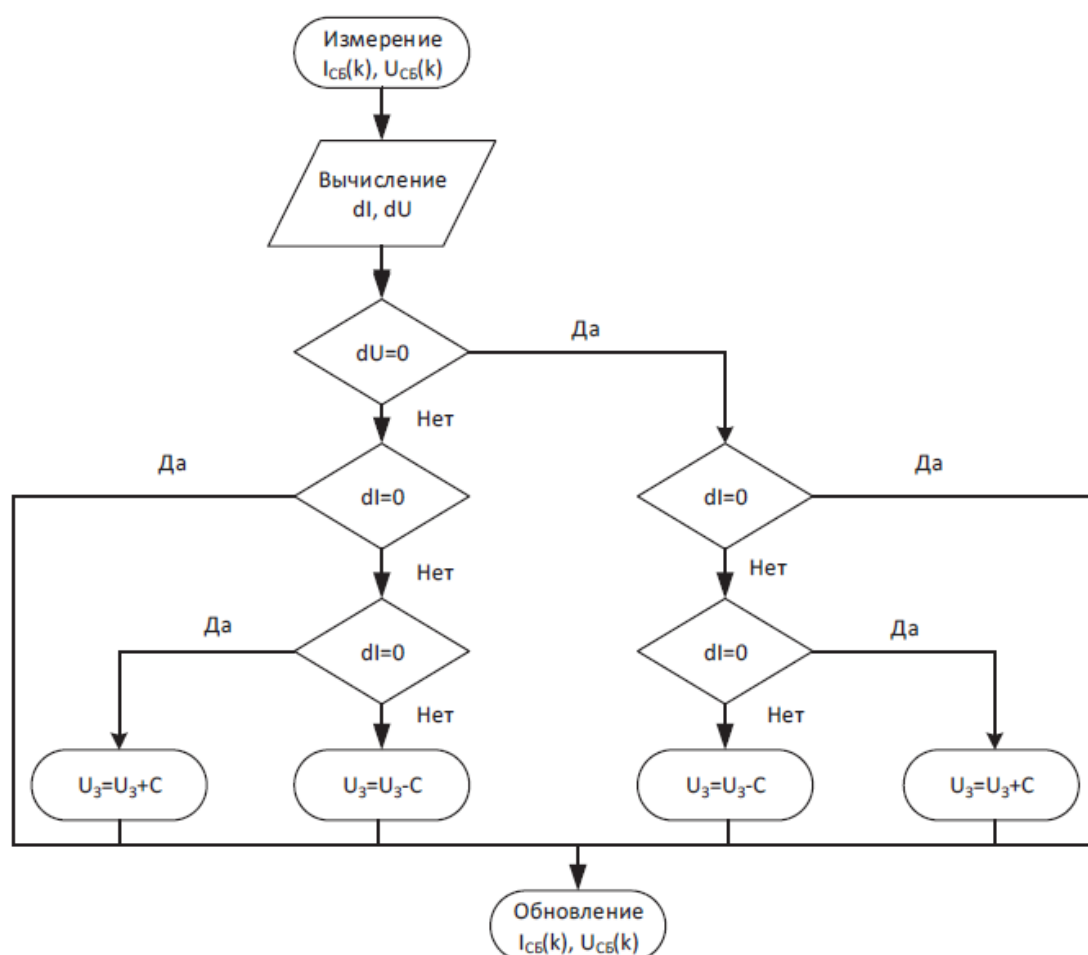


Рисунок 15 - Блок-схема ИС

Основное преимущество метода ИС заключается в его молниеносной адаптации к быстро меняющимся погодным условиям. Кроме того, этот метод колеблется вокруг точки МРР гораздо меньше, чем метод Р&О; тем не менее, эффективность этих двух алгоритмов будет примерно одинаковой при корректировке Р&О [43]. Однако для этого метода требуется сложная схема управления.

## Методы отслеживания с интеллектуальным прогнозированием

### Нечеткое логическое управление

Контроллеры нечёткой логики (FLC) являются основными МРРТ-контроллерами, используя  $E$  и  $\Delta E$  в качестве входов, а рабочий цикл - в качестве выхода. Обычный МРРТ-контроллер FLC имеет проблему дрейфа, связанную с быстрым изменением освещённости. Кроме того, каждый вход имеет пять принадлежностей и 25 правил, что делает реализацию более сложной и требует слишком много времени обработки [44-45]. МРРТ-контроллер на основе нечёткой логики включает три основных компонента: фаззификацию, механизм вывода и дефаззификацию, как показано на рисунке 16.

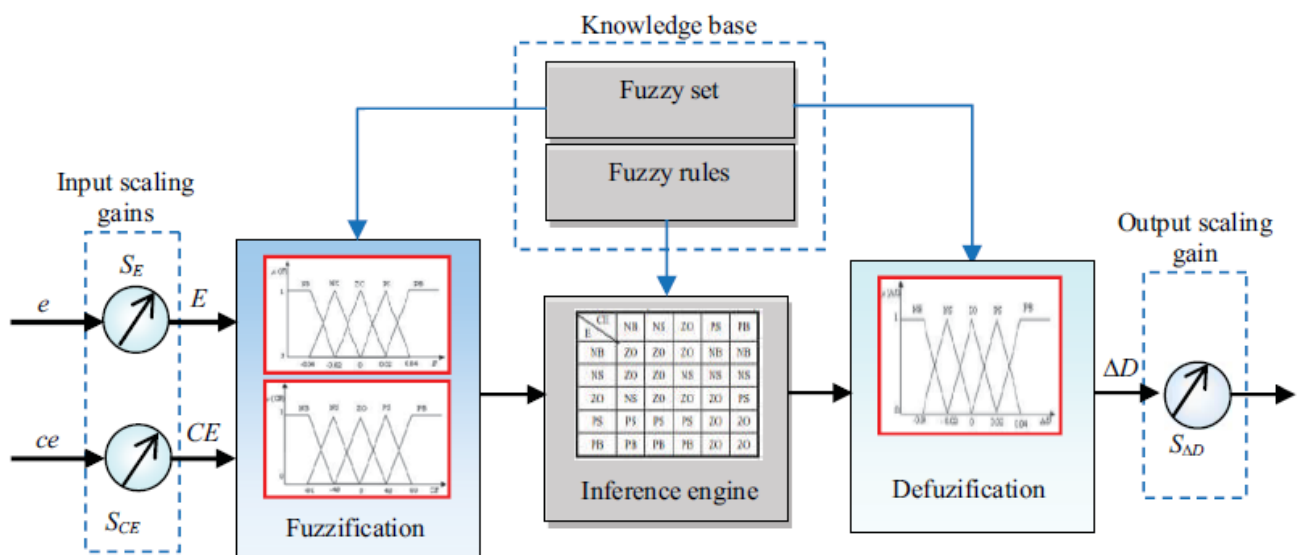


Рисунок 16 - Контроллер МРРТ на основе нечеткой логики

### Фаззификация

Переход от действительных к нечётким переменным возможен благодаря фаззификации. Непрерывные измерения действительного напряжения ( $V$ ) и тока ( $I$ ) фотоэлектрического генератора позволяют рассчитать мощность ( $P = V \times I$ ). Когда два требования к двум входным переменным предлагаемого регулятора — погрешность  $E$ , представляющая собой наклон пропорционально-интегральной характеристики, и изменение этой погрешности ( $CE$ ) — выполняются в момент дискретизации  $k$ , управление устанавливается.

Ниже приведены выражения (14, 15) для переменных E и CE [45]:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{I(k) - I(k-1)} \quad (14)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (15)$$

где  $P(k)$  и  $I(k)$  представляют собой мощность и ток фотоэлектрического генератора соответственно. Следовательно, входной сигнал  $CE(k)$  передает направление смещения рабочей точки в момент времени  $k$ , тогда как входной сигнал  $E(k)$  указывает, находится ли рабочая точка слева или справа от точки максимальной мощности (MPP) на пропорционально-интегральной характеристике (ПИ).

Выходом предлагаемого регулятора является изменение коэффициента заполнения ( $\Delta D$ ) DC-DC-преобразователя. Чтобы вернуть рабочую точку в идеальное положение, где наклон равен нулю, управление осуществляется путем корректировки этого коэффициента заполнения в соответствии с наклоном  $E(k)$ . На рисунке 16 показано, как входные переменные нечеткого регулятора ( $E$ ,  $CE$ ) получают из фактических сигналов ( $E$ ,  $CE$ ) путем умножения их на соответствующие коэффициенты масштабирования ( $SE$ ,  $SCE$ ). Затем, используя базовое нечеткое подмножество, они преобразуются в лингвистические переменные, такие как PB (положительный большой), PS (положительный малый), Z0 (нуль), NS (отрицательный малый) и NB (отрицательный большой). Степени принадлежности пяти основных нечетких подмножеств для входных и выходных переменных показаны на рисунке 17.

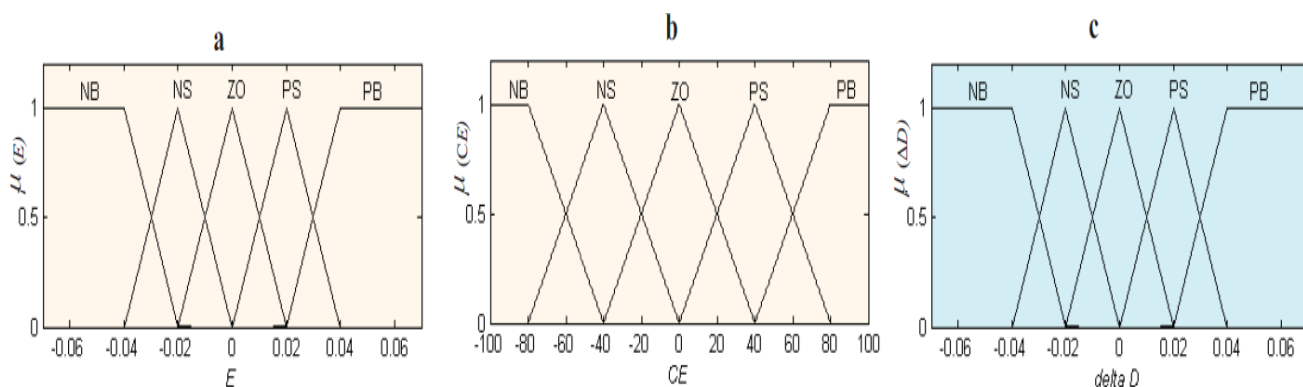


Рисунок 17- Функция принадлежности для входного значения E, входного значения CE и выходного значения дельта D

## Механизм вывода

Для определения нечётких выходов механизм вывода применяет правила к нечётким входным данным, таким образом, можно оценить правила. Для определения соответствующих лингвистических значений и степени соответствия каждого компонента необходимо провести фаззификацию чётких входных значений. В таблице 2 представлена таблица правил нечёткого контроллера с нечёткими наборами ошибок (E), изменений ошибок (CE) и изменений коэффициента заполнения ( $\Delta D$ ) для преобразователя в виде матричных элементов [45].

Таблица 2

Нечёткие правила					
Ошибка изменения	Ошибка				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	ZE	NP	NS	NS	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

## Дефаззификация

Было отмечено, что методы вывода работают с нечёткой информацией, предоставляя функцию для результирующей переменной. Необходимо представить себе преобразование этой нечёткой информации в предсказуемую, известное как дефаззификация, поскольку преобразователю DC-DC необходим точный управляющий сигнал  $D$  на входе. Два распространённых алгоритма дефаззификации — это метод максимального критерия (МСМ) и метод центра площади (СОА). Наиболее распространённым методом дефаззификации является нахождение центра (СОА) окончательного объединённого нечёткого множества (16).

$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j) \cdot \Delta D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j)} \quad (16)$$

Объединение всех выходных нечётких множеств правил определяет окончательное объединённое нечёткое множество [45]. После дефаззификации по (16) и масштабирования по коэффициенту усиления  $S_{\Delta D}$  выходной сигнал нечеткого регулятора, представляющий собой изменение коэффициента заполнения  $\Delta D(k)$ , преобразуется в фактический коэффициент заполнения  $D(k)$  с помощью (17):

$$D(k) = D(k-1) + S_{\Delta D} \cdot \Delta D(k) \quad (17)$$

## Нейронная сеть

Подход нейронных сетей, основанный на процессе обучения окружающей среде, также рассматривается как технология интеллектуального отслеживания. Как показано на рисунке 18, он состоит из трёх уровней: входного, скрытого и выходного. Входными переменными могут быть атмосферные данные, такие как температура и освещённость, характеристики фотоэлектрического модуля, такие как напряжение (VOC) и интенсивный электрический заряд (ISC), или любая их комбинация. В зависимости от метода, используемого в скрытом слое, выходным сигналом является сигнал рабочего цикла, который обеспечивает работу преобразователя для отслеживания MPP. На рисунке 18 связь между узлами  $I$  и  $J$  обозначена как имеющая значение  $W_{ij}$ .

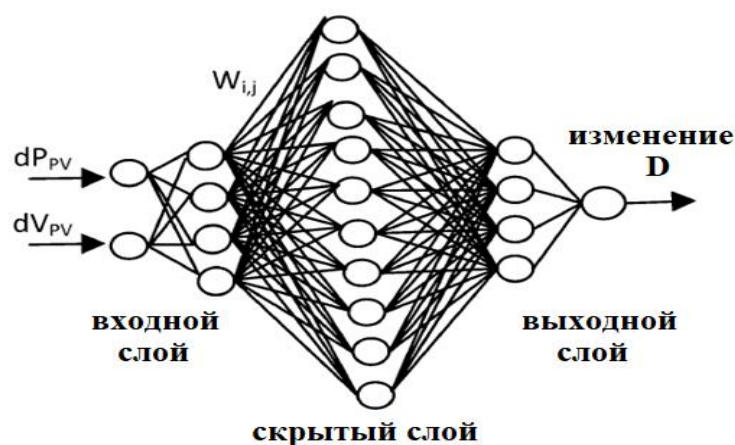


Рисунок 18 - Слои нейронной сети

Чтобы определить правильное значение для каждого узла, метод нейронных сетей взвешивает связи между узлами в соответствии с процедурой обучения, в ходе которой параметры фотоэлектрических модулей оцениваются и регистрируются в течение месяцев или лет.

Недостатком этого метода является то, что нейронная сеть должна быть обучена для конкретного используемого фотоэлектрического модуля; в противном случае её невозможно адаптировать для работы со многими типами одновременно без обучения. Кроме того, свойства фотоэлектрической панели меняются со временем, что говорит о том, что нейронную сеть необходимо периодически обучать для эффективного отслеживания MPP [46].

### **Биологический алгоритм преследования роя**

MPP можно отслеживать с помощью интеллектуального метода, аналогичного методологии оптимизации роя частиц (PSO), представленной в [46]. Роевой интеллект — это раздел искусственного интеллекта, исследующий поведение групп в децентрализованных системах. PSO — это широко используемая парадигма роевого интеллекта, изначально созданная путем моделирования социального поведения косяков рыб и стай птиц. Каждый фотоэлектрический модуль рассматривается как частица в предлагаемой фотоэлектрической системе на основе Bio-MPPT, в то время как MPP рассматривается как движущаяся цель. Каждый фотоэлектрический модуль использует алгоритм Bio-MPPT для автономного преследования MPP. Для осуществления преследования MPP этот подход предполагает, что каждый модуль в массиве фотоэлектрических модулей является подчинённым по отношению к одному ведущему модулю. Каждый модуль имеет свой собственный контроллер, взаимодействующий с ведущим контроллером. По сравнению с подходом P&O авторы [46] продемонстрировали повышение эффективности на 12,19%.

### **Обсуждение**

В данной работе рассмотрено множество подходов к изучению методов MPPT. Следует отметить, что каждый метод имеет свои плюсы и минусы, связанные с точностью и скоростью отслеживания, стоимостью компонентов, а также сложностями реализации. Кроме того, важно отметить, что размер электростанции, независимо от используемого метода, накладывает ограничения и ограничения на обязательные требования. Даже если нейронная сеть точнее,

чем система с постоянным напряжением, её использование на электростанции мощностью в несколько сотен ватт неэффективно. Поэтому необходимо учитывать компромисс между стоимостью устройства и доходом от дополнительной выработки электроэнергии. Выбор подходящего подхода зависит от предполагаемого использования. В данном исследовании обсуждаются ограничения и недостатки комплексной системы отслеживания, такие как скорость, стоимость, точность, сложность и т. д., по мере представления каждого метода. Как показано в таблице 3, где оцениваются тип входных данных, тип датчиков, скорость отслеживания, стабильность и настройка, стратегии МРРТ классифицируются в соответствии с методологией отслеживания, что позволяет выбрать наиболее подходящую стратегию. Однако мы хотим подчеркнуть, что, согласно обзорам литературы, большинство статей посвящено методу Р&О, и что исследование рынка показывает, что МРРТ на основе Р&О являются наиболее распространенными.

Это не обязательно означает безупречность алгоритма, но, поскольку такой метод отслеживания может быть применен к любой фотоэлектрической панели без знания ее особенностей, он может быть хорошим вариантом для производителей и конечных пользователей. Однако, поскольку он лучше работает при колебаниях вокруг МРР, метод ИС также широко используется в литературе и иногда противопоставляется методу Р&О. Это верно с точки зрения точности, но когда дело доходит до реализации алгоритма ИС, метод требует контроллера с плавающей запятой для решения дифференциальных уравнений, что делает его более дорогим, чем проектирование схем Р&О. Как правило, методы, основанные на искусственном интеллекте, являются наиболее быстрыми и чрезвычайно стабильными. Однако эти методы требуют, как минимум двух датчиков и подходят только для цифровых приложений. Более того, хотя методы с возможностью настройки периода являются быстрыми, они нестабильны и работают только с переменным током. Наконец, по перечисленным выше причинам выбор подходящего подхода основывается на предполагаемой цели и параметрах проекта (стоимость, точность и т. д.).

Сравнительная таблица МРРТ

Метод МРРТ	Реализация	Стоимость	Необходимые данные	Предварительная подготовка	Отслеживание скорости	Колесаний	Расчет МРРТ	Отслеживание производительности
CV	простой	дешевый	да	да	Fast	низкий	приблизительный	низкий
OCV	простой	дешевый	да	да	Fast	низкий	приблизительный	низкий
SCC	простой	дешевый	да	да	Fast	низкий	приблизительный	низкий
TG	простой	дешевый	да	да	Fast	низкий	приблизительный	низкий
FBV Or FBC	простой	дешевый	нет	нет	медленный	низкий	приблизительный	низкий
P-N Junction drop voltage	простой	дешевый	да	да	Fast	низкий	приблизительный	низкий
Look-Up table	простой	дорогой	да	да	Fast	низкий	точный	низкий
Load Current or Voltage	простой	дешевый	нет	нет	низкий	низкий	приблизительный	низкий
LCC	простой	дешевый	нет	нет	медленный	низкий	точный	низкий
P&O	средний	дорогой	нет	нет	медленный	высокий	приблизительный	низкий
MP&O-FP	средний	дорогой	нет	нет	средний	средний	точный	средний
POS	простой	дешевый	нет	нет	медленный	низкий	точный	низкий
Three-Point weight	средний	дорогой	нет	нет	быстрый	низкий	точный	низкий
DC-Link voltage capacitor	средний	дорогой	нет	нет	быстрый	низкий	точный	низкий
SS	простой	дешевый	нет	нет	быстрый	низкий	точный	низкий
dP/dV or dP/dI	простой	дешевый	нет	нет	медленный	низкий	точный	низкий
SMC	средний	дорогой	нет	нет	быстрый	низкий	точный	средний
RCC	средний	дорогой	нет	нет	быстрый	низкий	точный	низкий
PC	средний	дорогой	нет	нет	быстрый	низкий	точный	низкий
IC	сложный	дорогой	нет	нет	медленный	средний	точный	низкий
FLC	сложный	дорогой	нет	да	быстрый	средний	очень точный	средний
ANN	сложный	дорогой	да	да	медленный	средний	очень точный	высокий
Biological swarm chasing	сложный	дорогой	нет	нет	медленный	средний	очень точный	высокий

## **Заключение**

В последние годы учёные и исследователи стремятся повысить эффективность систем возобновляемой энергии, и одним из направлений, привлекающих большое внимание, является МРРТ (контроль точки максимальной мощности), направленный на разработку новых алгоритмов для извлечения максимальной энергии из источника. Фотоэлектрические системы используются во многих технических узлах и блоках авиационной и космической техники. На космических станциях они являются основным генерирующим компонентом электроснабжения. Повышение эффективности работы солнечных панелей значительно увеличивает выработку электрической энергии, необходимую для качественной работы оборудования космических аппаратов. В данном исследовании рассматривается множество методов отслеживания точки максимальной мощности, большинство из которых используется в фотоэлектрических системах. Все эти методы направлены на максимизацию извлечения энергии, несмотря на сложность вычислений и установки. В исследовании особое внимание уделяется алгоритму отслеживания и анализу преимуществ и недостатков каждого подхода с учётом сложности реализации.

---

## **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

## **Список источников**

1. Y. Al-Saleh, "Renewable energy scenarios for major oil-producing nations: The case of Saudi Arabia," *Futures*, vol. 41, no. 9, pp. 650–662, 2009.
2. Волков А.С. Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ. 2023. № 128.
3. Issa, H. A., Abdali, L. M., Alhusseini, H., & Velkin, V. I. (2025). Design, Modeling, and Control of a Dual-Axis Solar Tracker Using Fractional Order PID Controllers for Enhanced Energy Efficiency. *Results in Engineering*, 106073.

4. X. Li, Q. Wang, H. Wen, and W. Xiao, "Comprehensive Studies on Operational Principles for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 121407–121420, 2019.
5. Al-Maliki M.N., Soldan M., Issa H.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kobeticova H. The performance and advanced cooling techniques for photovoltaic solar panels. *MM Science Journal*. 2024.
6. Issa H.A., Abdali L.M., Velkin V.I. A stand-alone hybrid power system based on PV energy and hydrogen fuel cells with energy storage systems // *MM Science Journal*. 2024.
7. D. Ounnas, M. Ramdani, S. Chenikher, and T. Bouktir, "An Efficient Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Systems Using Takagi–Sugeno Fuzzy Models," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 42, no. 12, pp. 4971–4982, 2017.
8. A. M. A. Haidar and N. Julai, "An improved scheme for enhancing the ride-through capability of grid-connected photovoltaic systems towards meeting the recent grid codes requirements," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 50, pp. 38–49, 2019.
9. M. Birane, C. Larbes, and A. Cheknane, "Comparative study and performance evaluation of central and distributed topologies of photovoltaic system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 13, pp. 8703–8711, 2017.
10. N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, "General review and classification of different MPPT Techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. July 2016, pp. 1–18, 2017.
11. H. Jeong, H. Lee, Y. C. Liu, and K. A. Kim, "Review of Differential Power Processing Converter Techniques for Photovoltaic Applications," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 1, pp. 351–360, 2019.
12. O. Wasynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3031–3037, 1983.
13. Исса Х.А., Абдали Л.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Федотикова М.В. Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // *Труды МАИ*. 2023. № 128.
14. Абдали Л.М., Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Конева С.А., Цалоев В.М. Увеличение производительности фотоэлектрических преобразователей при

использовании высокотехнологичных систем охлаждения // Труды МАИ. 2025. № 141.

15. T. Shimizu, O. Hashimoto, and G. Kimura, "A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 704–711, 2003.

16. A. Al-Amoudi and L. Zhang, "Optimal control of a grid-connected PV system for maximum power point tracking and unity power factor," *IEE Conf. Publ.*, no. 456, pp. 80–84, 1998.

17. S. D. Al-Majidi, M. F. Abbod, and H. S. Al-Raweshidy, "A Modified P&O-MPPT based on Pythagorean Theorem and CV-MPPT for PV Systems," *Proc. - 2018 53rd Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2018*, pp. 1–6, 2018.

18. M. Park and I. K. Yu, "A study on the optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 3, pp. 2040–2045, 2004.

19. Layth M. Abd Ali, L.M. Ali, Q.A., Klačková I., Issa H.A., Yakimovich B.A., Kuvshimov V.V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021. V. 26 (4), P. 773-783.

20. S. P. S. System, K. Kobayashi, H. Matsuo, and Y. Sekine, "An Excellent Operating Point Tracker of the," vol. 53, no. 2, pp. 495–499, 2006.

21. Y. Kim, H. Jo, and D. Kim, "New peak power tracker for cost-effective photovoltaic power system," *Proc. Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf.*, vol. 3, pp. 1673–1678, 1996.

22. A. S. Kislovski and R. Redl, "Maximum-power-tracking using positive feedback," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 2, pp. 1065–1068, 1994, doi: 10.1109/pesc.1994.373812.

23. Абдали Л.М., Якимович Б.А., Сяктерева В.В., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Оптимизация системы автоматического управления точкой максимальной мощности для ветро-солнечной генерирующей установки с накопителями энергии // Труды МАИ. 2023. № 129.

24. M. H. A. Hasan, S. A. Siddiaue, M. Rahman, B. Saha, and R. Basak, "An Effective Solar Powered Charging System Using Resonant LCC Boost Converter," 2024 Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Electr. Smart Syst. Innov. Sustain. iCACCESS 2024, no. March, 2024.
25. C. Xing et al., "LCC-HVDC Frequency Robust Control Strategy Based on System Parameter Identification in Islanded Operation Mode," *Electron.*, vol. 13, no. 5, 2024.
26. R. Alik and A. Jusoh, "Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation," *Sol. Energy*, vol. 148, pp. 128–139, 2017.
27. Абдали Л.М.А., Аль-Малики М.Н.К., Аль Баирмани А.Г. и др. Анализ методов управления производительностью преобразователей постоянного тока солнечных элементов и выбор оптимального метода // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 125-137.
28. N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
29. B. Naima et al., "Enhancing MPPT optimization with hybrid predictive control and adaptive P&O for better efficiency and power quality in PV systems," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–31, 2025,
30. Y. Wang and L. Sun, "An Improved Global Perturbation Observation Algorithm for Partially Shaded Photovoltaic Arrays," *IEEE Access*, vol. 12, no. October, pp. 165017–165025, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3487850.
31. S. Li, "A MPPT speed optimization strategy for photovoltaic system using VWP interval based on weather forecast," *Optik (Stuttg.)*, vol. 192, no. March, p. 162958, 2019.
32. Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Кувшинов В.В. Кузнецов П.Н., Морозова Н.В. Математическое моделирование с использованием алгоритма контроля точки максимальной мощности для фотоэлектрической системы// Труды МАИ. 2023. № 130.

33. T. Kitano, M. Matsui, and D. hong Xu, "Power sensor-less MPPT control scheme utilizing power balance at DC link system design to ensure stability and response," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf., vol. 2, no. C, pp. 1309–1314, 2001.*
34. E. I. Batzelis, G. Anagnostou, and B. C. Pal, "A state-space representation of irradiance-driven dynamics in two-stage photovoltaic systems," *IEEE J. Photovoltaics, vol. 8, no. 4, pp. 1119–1124, 2018.*
35. J. Ni and J. Xiang, "A Concise Control Method Based on Spatial-Domain  $dp/dv$  Calculation for MPPT / Power Reserved of PV Systems," *IEEE Trans. Energy Convers., vol. 38, no. 1, pp. 3–14, 2023.*
36. S. Bouchakour, A. H. Arab, K. Abdeladim, S. Boulahchiche, S. O. Amrouche, and A. Razagui, "Evaluation of the PV energy production after 12-years of operating," *AIP Conf. Proc., vol. 1968, no. May, 2018.*
37. Анализ различных методов отслеживания точки максимальной мощности при работе солнечных фотоэлектрических систем / Л. М. А. Абдали, Х. А. И. Исса, М. Н. К. Аль-Малики, Б. А. Якимович, В. В.Кувшинов // *Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 3. С. 104–113.*
38. M. Shim, J. Jeong, J. Maeng, I. Park, and C. Kim, "Fully Integrated Low-Power Energy Harvesting System with Simplified Ripple Correlation Control for System-on-a-Chip Applications," *IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 5, pp. 4353–4361, 2019.*
39. G. Spiazzi, S. Buso, and P. Mattavelli, "Analysis of MPPT algorithms for photovoltaic panels based on ripple correlation techniques in presence of parasitic components," *2009 Brazilian Power Electron. Conf. COBEP2009, pp. 88–95, 2009.*
40. M. Alsumiri, "Residual Incremental Conductance Based Nonparametric MPPT Control for Solar Photovoltaic Energy Conversion System," *IEEE Access, vol. 7, pp. 87901–87906, 2019.*
41. N. Bouarroudj et al., "Fuzzy based incremental conductance algorithm stabilized by an optimal integrator for a photovoltaic system under varying operating conditions," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff., vol. 47, no. 1, pp. 9682–9707, 2025.*
42. I. M. Elzein, M. Kurdi, and Y. Harrye, "Optimizing The Maximum Power of Photovoltaic System Using Modified Incremental Conductance Algorithm Operating

Under Varying Dynamic Climatic Conditions,” *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 465–485, 2024.

43. H. Shahid, M. Kamran, Z. Mehmood, M. Y. Saleem, M. Mudassar, and K. Haider, “Implementation of the novel temperature controller and incremental conductance MPPT algorithm for indoor photovoltaic system,” *Sol. Energy*, vol. 163, no. January, pp. 235–242, 2018.

44. N. Guler, Z. Ben Hazem, and A. Gunes, “Optimizing solar PV systems using fuzzy logic for Climate-Resilient Healthcare infrastructure in Kyrgyzstan,” *Green Technol. Sustain.*, vol. 3, no. 3, p. 100190, 2025.

45. S. S. Kumar and K. Balakrishna, “A novel design and analysis of hybrid fuzzy logic MPPT controller for solar PV system under partial shading conditions,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, 2024.

46. A. Dawahdeh, H. Sharadga, and S. Kumar, “Novel MPPT Controller Augmented with Neural Network for Use with Photovoltaic Systems Experiencing Rapid Solar Radiation Changes,” *Sustain.*, vol. 16, no. 3, 2024.

## References

1. Y. Al-Saleh, “Renewable energy scenarios for major oil-producing nations: The case of Saudi Arabia,” *Futures*, vol. 41, no. 9, pp. 650–662, 2009, doi: 10.1016/j.futures.2009.04.005.

2. Volkov A.S. The development of simulation model of channel with burst error arrays. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). DOI: 10.34759/trd-2023-128-12

3. Issa, H. A., Abdali, L. M., Alhousseini, H., & Velkin, V. I. (2025). Design, Modeling, and Control of a Dual-Axis Solar Tracker Using Fractional Order PID Controllers for Enhanced Energy Efficiency. *Results in Engineering*, 106073.

4. X. Li, Q. Wang, H. Wen, and W. Xiao, “Comprehensive Studies on Operational Principles for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 121407–121420, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937100.

5. Al-Maliki M.N., Soldan M., Issa H.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kobeticova H. The performance and advanced cooling techniques for photovoltaic solar panels. *MM Science Journal*. 2024. DOI: 10.17973/MMSJ.2024\_11\_2024055

6. Issa H.A., Abdali L.M., Velkin V.I. A stand-alone hybrid power system based on PV energy and hydrogen fuel cells with energy storage systems // MM Science Journal. 2024. DOI: 10.17973/MMSJ.2024\_12\_2024102
7. D. Ounnas, M. Ramdani, S. Chenikher, and T. Bouktir, "An Efficient Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Systems Using Takagi–Sugeno Fuzzy Models," Arab. J. Sci. Eng., vol. 42, no. 12, pp. 4971–4982, 2017, doi: 10.1007/s13369-017-2532-0.
8. A. M. A. Haidar and N. Julai, "An improved scheme for enhancing the ride-through capability of grid-connected photovoltaic systems towards meeting the recent grid codes requirements," Energy Sustain. Dev., vol. 50, pp. 38–49, 2019, doi: 10.1016/j.esd.2019.02.007.
9. M. Birane, C. Larbes, and A. Cheknane, "Comparative study and performance evaluation of central and distributed topologies of photovoltaic system," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 42, no. 13, pp. 8703–8711, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.192.
10. N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, "General review and classification of different MPPT Techniques," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 68, no. July 2016, pp. 1–18, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.132.
11. H. Jeong, H. Lee, Y. C. Liu, and K. A. Kim, "Review of Differential Power Processing Converter Techniques for Photovoltaic Applications," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 34, no. 1, pp. 351–360, 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2876176.
12. O. Wasynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-102, no. 9, pp. 3031–3037, 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.318109.
13. Issa Kh.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Morozova N.V., Fedotikova M.V. Comparison of the effectiveness of various methods for controlling the energy parameters of photovoltaic systems. Trudy MAI. 2023. No. 128. (In Russ.). DOI: 10.34759/trd-2023-128-17
14. AbdAli L.M., Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Koneva S.A., Tsaloev V.M. Increasing the performance of photovoltaic converters using high-tech cooling systems. Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.).

15. T. Shimizu, O. Hashimoto, and G. Kimura, "A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 704–711, 2003, doi: 10.1109/TPEL.2003.809375.
16. A. Al-Amoudi and L. Zhang, "Optimal control of a grid-connected PV system for maximum power point tracking and unity power factor," *IEE Conf. Publ.*, no. 456, pp. 80–84, 1998, doi: 10.1049/cp:19980504.
17. S. D. Al-Majidi, M. F. Abbod, and H. S. Al-Raweshidy, "A Modified P&O-MPPT based on Pythagorean Theorem and CV-MPPT for PV Systems," *Proc. - 2018 53rd Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/UPEC.2018.8542049.
18. M. Park and I. K. Yu, "A study on the optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 3, pp. 2040–2045, 2004, doi: 10.1109/iecon.2004.1432110.
19. Layth M. Abd Ali, L.M. Ali, Q.A., Klačková I., Issa H.A., Yakimovich B.A., Kuvshimov V.V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021. V. 26 (4), P. 773-783. DOI: 10.46544/AMS.v26i4.14
20. S. P. S. System, K. Kobayashi, H. Matsuo, and Y. Sekine, "An Excellent Operating Point Tracker of the," vol. 53, no. 2, pp. 495–499, 2006.
21. Y. Kim, H. Jo, and D. Kim, "New peak power tracker for cost-effective photovoltaic power system," *Proc. Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf.*, vol. 3, pp. 1673–1678, 1996, doi: 10.1109/iecec.1996.553353.
22. A. S. Kislovski and R. Redl, "Maximum-power-tracking using positive feedback," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 2, pp. 1065–1068, 1994, doi: 10.1109/pesc.1994.373812.
23. Abdali L.M., Yakimovich B.A., Syaktereva V.V., Kuvshinov V.V., Morozova N.V. Optimization of the automatic control system for the maximum power point for a wind-solar generating plant with energy storage. *Trudy MAI*. 2023. No. 129. (In Russ.). DOI: 10.34759/trd-2023-129-24
24. M. H. A. Hasan, S. A. Siddiaue, M. Rahman, B. Saha, and R. Basak, "An Effective Solar Powered Charging System Using Resonant LCC Boost Converter," *2024 Int. Conf.*

Adv. Comput. Commun. Electr. Smart Syst. Innov. Sustain. iCACCESS 2024, no. March, 2024, doi: 10.1109/iCACCESS61735.2024.10499600.

25. C. Xing et al., "LCC-HVDC Frequency Robust Control Strategy Based on System Parameter Identification in Islanded Operation Mode," *Electron.*, vol. 13, no. 5, 2024, doi: 10.3390/electronics13050951.

26. R. Alik and A. Jusoh, "Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation," *Sol. Energy*, vol. 148, pp. 128–139, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.03.064.

27. Abdali L.M.A., Al'-Maliki M.N.K., Al' Bairmani A.G. et al. Analysis and selection of the optimal performance control method for solar cell dc converters. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023. V. 21, No. 1. P. 125-137. (In Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-125-137

28. N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.850975.

29. B. Naima et al., "Enhancing MPPT optimization with hybrid predictive control and adaptive P&O for better efficiency and power quality in PV systems," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–31, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-10335-0.

30. Y. Wang and L. Sun, "An Improved Global Perturbation Observation Algorithm for Partially Shaded Photovoltaic Arrays," *IEEE Access*, vol. 12, no. October, pp. 165017–165025, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3487850.

31. S. Li, "A MPPT speed optimization strategy for photovoltaic system using VWP interval based on weather forecast," *Optik (Stuttg.)*, vol. 192, no. March, p. 162958, 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.162958.

32. AbdAli L.M., Al-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., Kuznetsov P.N., Morozova N.V. Mathematical technique modeling using the algorithm for control of the maximum power point for a photoelectric system. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. DOI: 10.34759/trd-2023-130-20

33. T. Kitano, M. Matsui, and D. hong Xu, "Power sensor-less MPPT control scheme utilizing power balance at DC link system design to ensure stability and

response,” IECON Proc. (Industrial Electron. Conf., vol. 2, no. C, pp. 1309–1314, 2001, doi: 10.1109/iecon.2001.975971.

34. E. I. Batzelis, G. Anagnostou, and B. C. Pal, “A state-space representation of irradiance-driven dynamics in two-stage photovoltaic systems,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 4, pp. 1119–1124, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2839261.

35. J. Ni and J. Xiang, “A Concise Control Method Based on Spatial-Domain  $dp/dv$  Calculation for MPPT / Power Reserved of PV Systems,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 38, no. 1, pp. 3–14, 2023, doi: 10.1109/TEC.2022.3195565.

36. S. Bouchakour, A. H. Arab, K. Abdeladim, S. Boulahchiche, S. O. Amrouche, and A. Razagui, “Evaluation of the PV energy production after 12-years of operating,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1968, no. May, 2018, doi: 10.1063/1.5039220.

37. Abdali L. M., Issa H. A., Al-Maliki M. N., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V. Analysis Study and Comparison of Different Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic Systems, *Intelligent Systems in Manufacturing (Intellekt. Sist. Proizv.) 2022*. Vol. 20. N. 3 P. 104–113.

38. M. Shim, J. Jeong, J. Maeng, I. Park, and C. Kim, “Fully Integrated Low-Power Energy Harvesting System with Simplified Ripple Correlation Control for System-on-a-Chip Applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4353–4361, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2863390.

39. G. Spiazzi, S. Buso, and P. Mattavelli, “Analysis of MPPT algorithms for photovoltaic panels based on ripple correlation techniques in presence of parasitic components,” *2009 Brazilian Power Electron. Conf. COBEP2009*, pp. 88–95, 2009, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347738.

40. M. Alsumiri, “Residual Incremental Conductance Based Nonparametric MPPT Control for Solar Photovoltaic Energy Conversion System,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 87901–87906, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925687.

41. N. Bouarroudj et al., “Fuzzy based incremental conductance algorithm stabilized by an optimal integrator for a photovoltaic system under varying operating conditions,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 47, no. 1, pp. 9682–9707, 2025, doi: 10.1080/15567036.2021.1955049.

42. I. M. Elzein, M. Kurdi, and Y. Harrye, "Optimizing The Maximum Power of Photovoltaic System Using Modified Incremental Conductance Algorithm Operating Under Varying Dynamic Climatic Conditions," *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 465–485, 2024, doi: 10.12785/ijcds/150136.
43. H. Shahid, M. Kamran, Z. Mehmood, M. Y. Saleem, M. Mudassar, and K. Haider, "Implementation of the novel temperature controller and incremental conductance MPPT algorithm for indoor photovoltaic system," *Sol. Energy*, vol. 163, no. January, pp. 235–242, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.02.018.
44. N. Guler, Z. Ben Hazem, and A. Gunes, "Optimizing solar PV systems using fuzzy logic for Climate-Resilient Healthcare infrastructure in Kyrgyzstan," *Green Technol. Sustain.*, vol. 3, no. 3, p. 100190, 2025, doi: 10.1016/j.grets.2025.100190.
45. S. S. Kumar and K. Balakrishna, "A novel design and analysis of hybrid fuzzy logic MPPT controller for solar PV system under partial shading conditions," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-60870-5.
46. A. Dawahdeh, H. Sharadga, and S. Kumar, "Novel MPPT Controller Augmented with Neural Network for Use with Photovoltaic Systems Experiencing Rapid Solar Radiation Changes," *Sustain.*, vol. 16, no. 3, 2024, doi: 10.3390/su16031021.

### Информация об авторах

**Хайдер Альхуссейни**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники инженерного факультета университета Куфы, г. Наджаф, Ирак; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2268-7785>; ScopusID: 57225196280; e-mail: [laith\\_2210@yahoo.com](mailto:laith_2210@yahoo.com)

**Лайт Мохаммед Абдали**, кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры электротехники инженерного университета Куфы, г. Наджаф, Ирак; SPIN-код: 9791-6042; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4490-4031>; ScopusID: 57211838353; ResearcherID: F-2100-2018; e-mail: [laithm.abood@uokufa.edu.iq](mailto:laithm.abood@uokufa.edu.iq)

**Владимир Владиславович Кувшинов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Электроэнергетики, Севастопольский Государственный Университет, г. Севастополь, Россия; SPIN-код: 2293-1983; AuthorID: 859617;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1422-4227>; Scopus ID: 57211503405;  
e-mail: [kuvshinov.vladimir@gmail.com](mailto:kuvshinov.vladimir@gmail.com)

**Елена Виктарьевна Гусева**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Судовое электрооборудование, Севастопольский Государственный Университет, г. Севастополь, Россия; SPIN-код: 8630-5870; AuthorID: 1019214; e-mail: [alenaalena73@mail.ru](mailto:alenaalena73@mail.ru)

### Information about the authors

**Haider Alhousseini**, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor in Department of Electrical Engineering, College of Engineering, University of Kufa, Najaf, Iraq; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2268-7785>; ScopusID: 57225196280; e-mail: [laith\\_2210@yahoo.com](mailto:laith_2210@yahoo.com)

**Laith Mohammed Abdali**, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Electrical Engineering, University of Kufa, Najaf, Iraq; SPIN-код: 9791-6042; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4490-4031>; ScopusID: 57211838353; ResearcherID: F-2100-2018; e-mail: [laithm.abood@uokufa.edu.iq](mailto:laithm.abood@uokufa.edu.iq)

**Vladimir V. Kuvshinov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia; SPIN-код: 2293-1983; AuthorID: 859617; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1422-4227>; Scopus ID: 57211503405; e-mail: [kuvshinov.vladimir@gmail.com](mailto:kuvshinov.vladimir@gmail.com)

**Elena V. Guseva**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Electrical Equipment, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia; SPIN-код: 8630-5870; AuthorID: 1019214; e-mail: [alenaalena73@mail.ru](mailto:alenaalena73@mail.ru)

---

Получено 15 октября 2025 ● Принято к публикации 30 января 2026 ● Опубликовано 27 февраля 2026  
Received 15 October 2025 ● Accepted 30 January 2026 ● Published 27 February 2026

---