

ПУТИ ПОИСКА И РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В ТОЧКЕ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

- **Заварухин В.А.**, канд. техн. наук, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия
- **Шашкин А.В.**, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия

WAYS TO FIND AND SOLVE ISSUES OF PHOTOVOLTAIC MODULE OPERATION AT THE MAXIMUM POWER POINT

- **Zavarukhin V.A.**, Ph.D., South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia
- **Shashkin A.V.**, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

В данной работе рассмотрены методы поиска оптимального режима работы фотоэлектрических модулей. Отмечена возможность негативного влияния работы модулей в точке максимальной мощности. Проблема использования точки максимальной мощности может быть актуальной при исследованиях режимов работы солнечных электростанций. При затенении лицевой поверхности модулей на графике вольт-амперной характеристики образуется ступенчатый график с локальными точками максимальной мощности на каждой из ступеней. Выбор точки максимальной мощности на таком графике влияет на срок службы затененного модуля. Полученные результаты анализа существующих методик подтверждают, что все методики определяют точку максимальной мощности без учета затененных участков модулей.

Ключевые слова: солнечная энергетика, точка максимальной мощности, фотоэлектрические модули.

This paper examines methods for finding the optimal operating mode of photovoltaic modules. The possibility of a negative impact of module operation at the maximum power point is noted. The problem of using the maximum power point may be relevant in studies of operating modes of solar power plants. When the front surface of the modules is shaded, the current-voltage characteristic graph becomes stepped, with local maximum power points on each of the steps. The choice of the maximum power point on such a graph affects the service life of the shaded module. The obtained results of the analysis of existing methods confirm that all methods determine the maximum power point without considering the shaded areas of the modules.

Key words: solar energy, maximum power point, photovoltaic modules.

Введение

Солнечная энергия является одним из основных вариантов генерации электроэнергии, т.к. она неисчерпаема, доступна практически везде и является экологически чистой. Сейчас всё боль-

ше стран переходит к выработке электрической мощности при помощи фотоэнергетических систем (ФЭС). Уже сегодня достигнуты большие успехи в улучшении технологии ФЭС ячеек, однако общая эффективность солнечного модуля все еще остается на низком уровне. Эффектив-

ность работы фотоэлектрического модуля определяется его работой в точке максимальной мощности вольтамперной характеристики (ВАХ). Поэтому для достижения максимальной эффективности фотоэлектрического модуля (ФЭМ) необходимо использовать алгоритм слежения за данной точкой, для того чтобы передавать в нагрузку максимально возможную, при данных условиях, мощность солнечного модуля. Эта задача осложняется различными природными факторами, решение которых также очень важно для достижения максимальной производительности и максимального срока службы ФЭМ.

Точка максимальной мощности

Эффективный режим работы определяется отношением тока (I_{mpp}) и напряжения (U_{mpp}) – точкой максимальной мощности (ТММ) (рисунок 1). Мощность фотоэлектрических модулей зависит от освещенности и температуры ячеек. Изменение этих параметров влияет на смещение этой точки на вольт-амперной характеристике. Это требует быстрого определения значений тока и напряжения ТММ при новых входных параметрах.

Поэтому при построении ФЭС необходимо учитывать проблемы затенения, недостаточной освещенности, перегрева, загрязнения модулей и нелинейной зависимости сгенерированного солнечного модулем тока от его выходного напряжения [1].

Обзор методов поиска точки максимальной мощности

Можно выделить два основных метода поиска экстремума – это метод «Возмущение и наблюдение» и метод «Возрастающая проводимость», которые являются основой многих похожих методов из-за их простых управляющих структур и удобства реализации. Также существуют более дешёвые методы, требующие меньшего количества датчиков, которые подходят для ФЭС с низким уровнем точности отслеживания ТММ: метод постоянного напряжения и тока, метод короткого замыкания, метод напряжения холостого хода.

1. Метод «Возмущение и наблюдение»

Регулирование режима работы модулей на основе прямого измерения мощности является

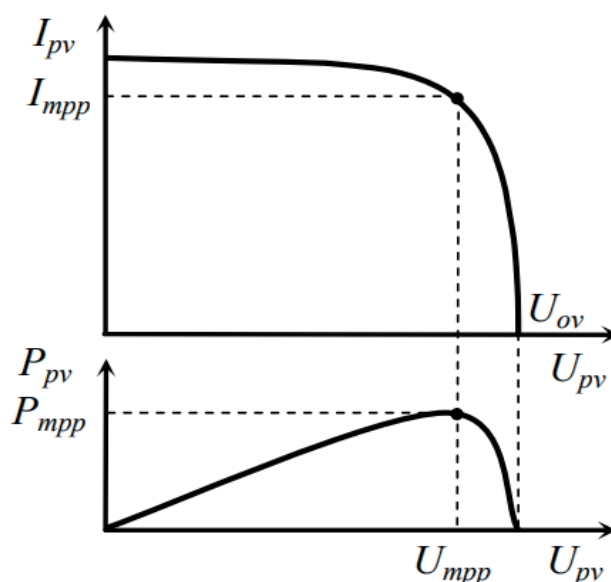


Рис. 1. Статистические характеристики солнечного модуля

самым распространенным методом, т.к. требует наименьших вычислительных затрат и наиболее прост в аппаратной реализации. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2 [2,3]. Принцип работы основан на пошаговом измерении мощности и поиске изгиба на графике мощности путем изменения опорного напряжения (рисунок 1). Поиск ТММ происходит до тех пор, пока происходит рост мощности при увеличении опорного напряжения. При уменьшении мощности опорное напряжение начинает уменьшаться.

2. Метод «Возрастающая проводимость»

Метод нацелен на поддержание ТММ путем простого измерения возрастающей и мгновенной проводимости при определении и регулировании рабочего напряжения солнечной батареи. Рабочий цикл преобразователя регулирует микроконтроллер.

По сравнению с методом возмущения и наблюдения, метод возрастающей проводимости может отслеживать ТММ с более высокой точностью, и он имеет более высокую точность во время меняющихся погодных условиях, однако снижает скорость выборки, так как требует большего объема вычислений [3,4].

3. Метод «Постоянного напряжения и тока»

Определение точки максимальной мощности основано на допущении незначительного изменения напряжения в точке максимальной мощности при изменении освещенности и температуры ФЭМ (смещение ТММ по напряжению происходит в пределах $\pm 2\%$ от стандартных условий

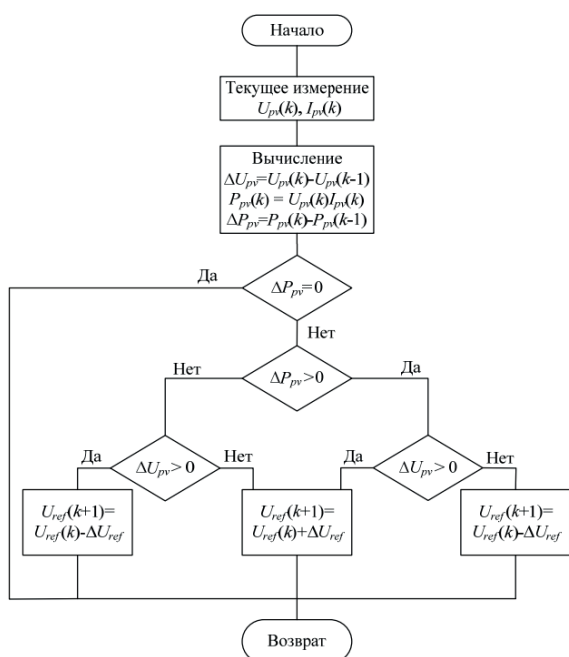


Рис. 2. Блок-схема алгоритма метода «Возмущение и наблюдение»

испытаний). Алгоритм работы изображен на рисунке 4. Данный метод не требует выведения модулей из работы для поддержания оптимального режима работы.

Регулирование режима ФЭМ происходит путем изменения тока нагрузки. Недостатком метода является отмеченное допущение, что при-

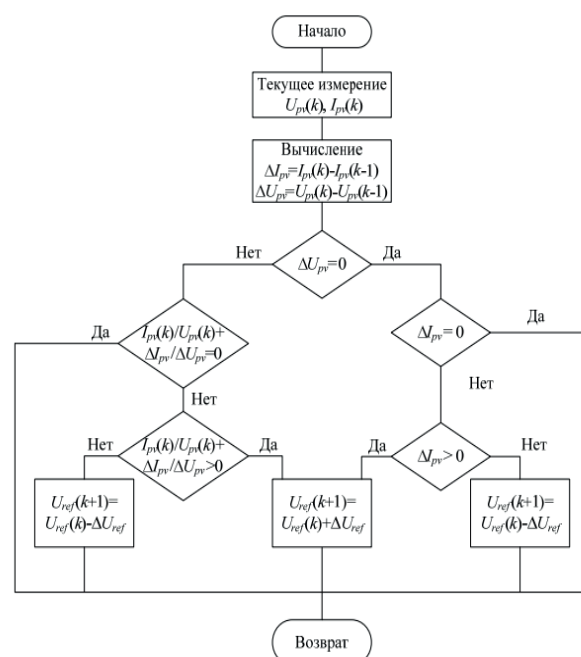


Рис. 3. Блок-схема алгоритма метода «Возрастающей проводимости»

водит к работе в режиме, близком к ТММ, но попадание в ТММ зачастую не происходит.

4. Метод «Короткого замыкания»

Ток короткого замыкания является непостоянной величиной и напрямую зависит от энергетической освещенности в течение суток (рисунок 5). Измерение тока короткого замыкания позво-

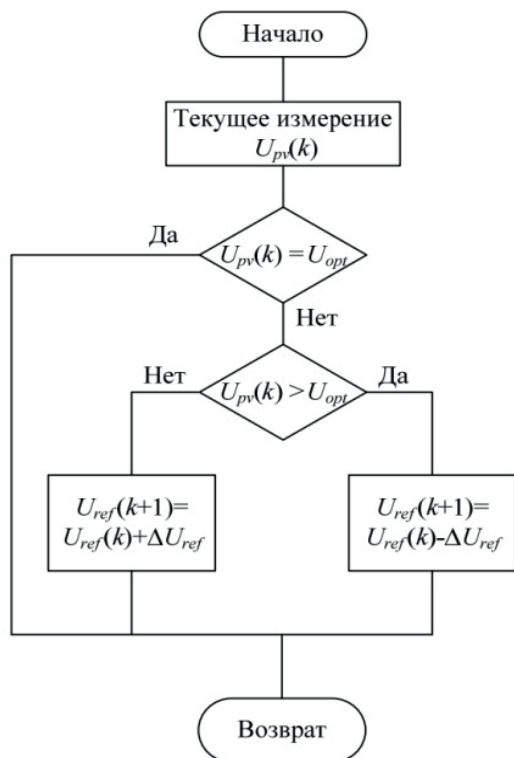


Рис. 4. Блок-схема алгоритма метода «Постоянного напряжения»

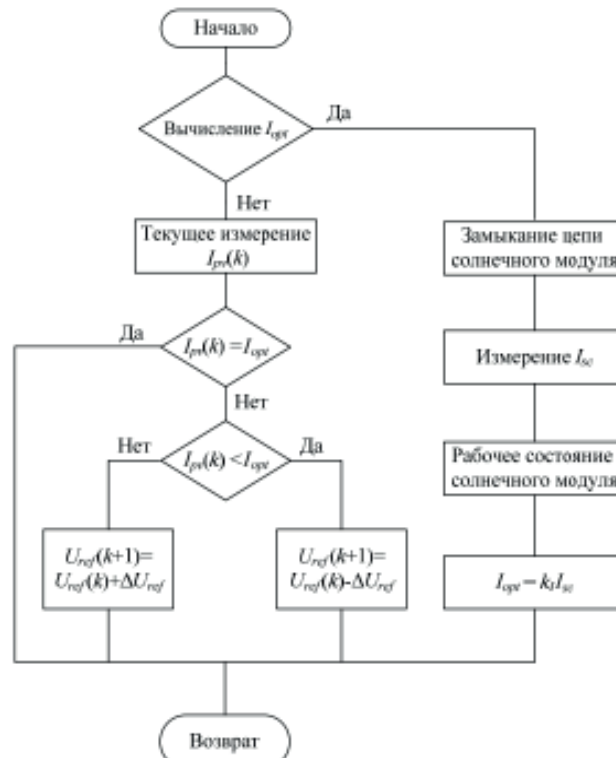


Рис. 5. Блок-схема метода короткого замыкания

ляет уточнить положение точки максимальной мощности. Для этого определяется опорное значение тока относительно тока короткого замыкания путем введения опорного коэффициента k , который находится в пределах 0,78–0,92. Контроллер формирует опорное напряжение, соответствующее оптимальному току на выходе модуля. Недостатком данного метода является периодическое выведение модулей из работы и неточное попадание в оптимальный режим работы, но точность выше, чем у предыдущего метода [1,2].

5. Метод «Холостого хода»

Для опорного регулирования оптимального режима работы также используется напряжение холостого хода (рисунок 6). При отключении модулей из работы вместо измерения тока короткого замыкания происходит измерение напряжения холостого хода. Опорное напряжение определяется путем умножения напряжения холостого хода на коэффициент k (коэффициент k находится в пределах 0,71–0,78).

Метод опирания на значение напряжения холостого хода имеет недостатки, аналогичные предыдущему. Достоинство – отсутствие колебаний возле точки MPP при постоянной солнечной радиации [1,2].

Результаты проведенного анализа приведены в таблице 1. Методы «возмущения и наблюдения» и «возрастающей проводимости» являются самыми распространенными в применении на СЭС промышленных масштабов. Однако, остальные методы могут быть вспомогательными

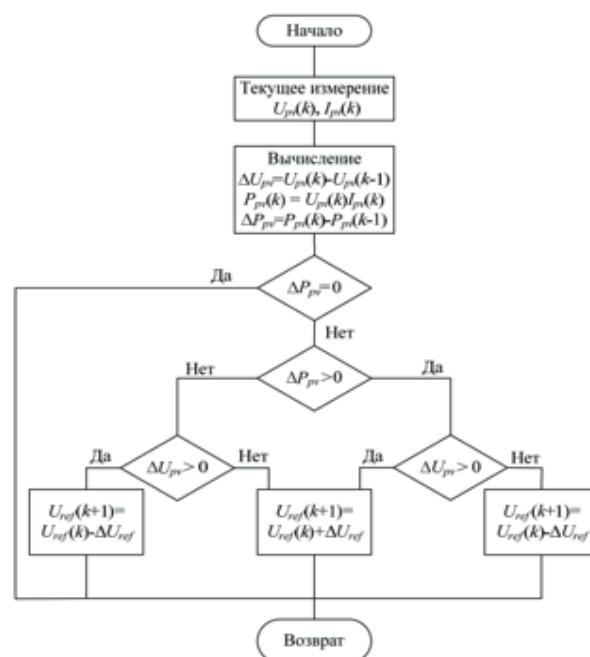


Рис. 6. Блок-схема алгоритма метода «Холостого хода»

ми при поиске неисправностей при работе модулей.

Факторы, определяющие работу солнечного модуля вблизи точки максимальной мощности

Существуют различные факторы влияния на солнечный модуль, которые выводят его работу из точки максимальной мощности и их влияние необходимо минимизировать. На работу солнечного модуля влияет ряд факторов, выводящих

Таблица 1 – Результаты анализа методов поиска ТММ

Методика регулирования	Особенности регулирования	Точность регулирования
Метод «Возмущения и наблюдения»	Не требует выведения ФЭМ из работы. Колебания вблизи ТММ происходят непрерывно.	Рабочее значение мощности находится вблизи истинной ТММ.
Метод «Возрастающая проводимость»	Не требует выведения ФЭМ из работы. Колебания прекращаются при достижении истинной ТММ.	Возможно достижение истинной ТММ.
Метод «Постоянного напряжения и тока»	Не требует выведения ФЭМ из работы	Рабочее значение мощности находится в диапазоне $\pm 2\%$ от установленного заранее значения напряжения в точке максимальной мощности. Низкая точность.
Метод «короткого замыкания»	Требует кратковременного выведения ФЭМ из работы для коррекции значения опорного тока	Рабочее значение мощности определяется относительно опорного значения. Точность выше, чем у предыдущего метода.
Метод «холостого хода»	Требует кратковременного выведения ФЭМ из работы для коррекции значения опорного напряжения	

его из точки максимальной мощности, среди которых наиболее распространены недостаточная освещённость, перегрев и загрязнение. Повлиять на погодные условия невозможно, тогда как проблема загрязнения наносит наибольший ущерб: при длительном сохранении загрязнений потери выработки могут достигать 5–30 %. Загрязнителями выступают пыль, сажа, металлические соединения, химические выбросы, а также листья, птичий помёт, остатки насекомых и биомасса. Частичное загрязнение вызывает неравномерную освещённость и появление «горячих точек» — зон локального перегрева, которые снижают выработку энергии, ускоряют износ фотоэлементов и сокращают срок службы модуля.

Для минимизации негативных последствий разработаны гидрофобные, антистатические и самоочищающиеся покрытия, уменьшающие налипание загрязнений. Мониторинг состояния панелей с помощью тепловизоров и камер высокого разрешения позволяет оперативно выявлять участки, нуждающиеся в обслуживании. Важен и угол наклона модулей: при оптимальном угле они лучше очищаются дождём. Проблему перегрева решают методами пассивного охлаждения и активными водяными системами. Одним из наиболее эффективных способов защиты считается использование голографической плёнки, которая предотвращает перегрев от инфракрасного излучения и повышает генерацию энергии за счёт миниатюрных призмаконов-концентраторов в структуре плёнки [5,6].

Выводы

Использование методик поиска ТММ позволяет эффективно использовать фотоэлектрические модули. Несмотря на это работа в ТММ может подвергаться ФЭМ работе в условиях, которые снижают ресурс.

Одним из таких условий является частичное затенение лицевой поверхности модулей, так как ТММ может попасть в область ВАХ, где затененные ячейки не исключены из работы шунтирующими диодами. Эта причина позволяет поставить цель дальнейших исследований в этой области.

Последовательное использование методов «Постоянного напряжения и тока» с одним из остальных позволит определять наличие затененных участков и избежать работы в режиме

работы, способном привести к повреждению затененных модулей.

Список литературы

1. Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник Чувашского университета. — № 3. — С. 76–93.
2. А.Г. Возмилов, С.А. Малюгин, А.А. Малюгина Алгоритмы слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей // Вестник ЧГАА. 2014. Том 70. С. 18–25.
3. Д.А. Безик, А.А. Халюзин Методы отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сборник материалов международной научно-технической конференции, Брянск, 17–19 апреля 2023 года. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2023. С. 52–65.
4. Пахомов, П. А. Методы отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) // Матрица научного познания. 2021. № 6-2. С. 57–65.
5. И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов Повышение эффективности работы солнечных электростанций: анализ факторов перегрева, загрязнения и деградации фотоэлектрических модулей // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2025. — Т. 10, № 1(39). С. 116–124. — DOI 10.25744/genb.2025.1.39.016.
6. Д.С. Горынцев, О.Е. Куракина Влияние различных видов загрязнений фотоэлектрических модулей на выработку электроэнергии солнечных электростанций // Техника и технология современных производств: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 06–07 мая 2025 года. — Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. С. 83–86.

References

1. Malinin G.V., Serebryannikov A.V Maximum power point tracking for PV array // Vestnik Chuvashskogo universiteta, 2016, no. 3, pp. 76–93.
2. Vozmilov A.G., Malyugin S.A., Malyugina A.A. Maximum power point tracking algorithms of photoelectric converters. Vestnik ChSAA, 2014, vol. 70, pp. 18–25
3. D.A. Bezik, A.A. Kalyuzin. Methods for

Tracking the Maximum Power Point of Solar Panels // Problems of Energy Supply, Automation, Informatization and Environmental Management in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Bryansk, April 17–19, 2023. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2023. Pp. 52-65.

4. Pakhomov, P. A. Methods for Tracking the Maximum Power Point (MPP) // Matrix of Scientific Knowledge. 2021. No. 6-2. Pp. 57-65.

5. I.M. Kirpichnikova, I.B. Makhsumov. Improving the Efficiency of Solar Power Plants: Analysis of Overheating, Contamination and

Degradation Factors of Photovoltaic Modules // Grozny Natural Science Bulletin. 2025. – Vol. 10, No. 1(39). Pp. 116-124. – DOI 10.25744/genb.2025.1.39.016.

6. D.S. Goryntsev, O.E. Kurakina. Influence of Various Types of Contamination of Photovoltaic Modules on the Electricity Generation of Solar Power Plants // Machinery and Technology of Modern Production: Collection of Papers of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Penza, May 6–7, 2025. – Penza: Penza State Agrarian University, 2025. Pp. 83-86.

Сведения об авторах

Заварухин Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия, zavarukhinva@susu.ru.

Шашкин Алексей Владимирович – магистрант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия, alvlshash2@gmail.com.

About the authors

Zavarukhin Vladimir Aleksandrovich – Ph.D, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, zavarukhinva@susu.ru.

Shashkin Alexey Vladimirovich – master's student of the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, alvlshash2@gmail.com.

Дата поступления рукописи: 06.05.2026

Дата принятия рукописи: 05.06.2026