

УДК 681.586.732(045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116

Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения эффективности работы фотоэлектрических установок

Л. М. Абдали, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

М. Н. Аль-Малики, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Х. А. Исса, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Фотогальванические системы имеют медленную динамику сходимости к точке максимальной мощности (ТММ), особенно те, которые оснащены повышающим преобразователем, основанным на методе традиционной инкрементной проводимости. В этой статье представлены моделирование и аппаратная реализация ТММ с переменным размером шага с автоматическим масштабированием при низких затратах и низком энергопотреблении. Работа фотоэлектрической энергии сильно зависит от погодных условий и окружающей среды, таких как температура и солнечное излучение. Из-за любого изменения внешней среды и единственного условия управления реакция первого шага рабочего цикла преобразователя традиционного алгоритма инкрементной проводимости ТММ не является точной, что приводит к неправильной оценке.

В этой статье описывается обычная методика (для традиционного алгоритма инкрементной проводимости) и предлагается новая методика для модифицированного алгоритма инкрементной проводимости, который точно реагирует при увеличении уровня солнечного излучения. Чтобы улучшить экономичность и эффективность фотоэлектрических систем, мы предложили улучшенный алгоритм инкрементной проводимости для стратегии управления ТММ. Представленный алгоритм инкрементной проводимости прост по структуре и может реагировать на мгновенные изменения мощности, напряжения и тока при изменении внешней среды, кроме того, может повысить эффективность отслеживания.

Программа MATLAB/Simulink проводит необходимые вычисления при изменении режимов работы солнечных батарей в условиях быстро меняющихся уровней солнечной радиации, где сравниваются результаты вычислений с использованием предложенного и обычного алгоритма инкрементной проводимости. Результаты экспериментальных данных показывают, что предложенный алгоритм может эффективно выявлять ошибки в работе и предотвращать их появление. Это не только оптимизирует систему, но также повышает эффективность ее работы, скорость отклика и эффективность отслеживания, обеспечивая тем самым стабильную работу энергосистемы.

Ключевые слова: солнечное излучение, фотоэлектрическая ячейка, фотоэлектрический модуль, ТММ-метод, инкрементальная проводимость.

Введение

Глобальный спрос на энергию, особенно на экологически чистую энергию, быстро растет. Возобновляемые источники энергии, особенно фотоэлектрические технологии (PV), представляют собой превосходную альтернативу, и сегодня они все чаще используются в энергетике [1]. Защита окружающей среды посредством контроля загрязнения, особенно выбросов парниковых газов, стала серьезной проблемой во всем мире. Хотя энергия, получаемая из ископаемого топлива, остается доступной и не исчезнет в ближайшее время, эра изобилия дешевой энергии продлится недолго, следовательно, изу-

чение альтернативной энергетики, особенно возобновляемых источников энергии, и решение экологических проблем, связанных с источниками энергии, стало необходимым [2]. Точка максимальной мощности (ТММ) – это точка на кривой ВАХ, в которой фотоэлектрический модуль работает с максимальной выходной мощностью. ТММ меняется в зависимости от изменяющихся условий, таких как уровень освещенности и температура [3–5]. Чтобы наилучшим образом использовать фотоэлектрические источники, важно всегда работать на ТММ. Основная задача ТММ – управлять фотоэлектрической системой и запускать ее вблизи точки

максимальной мощности [6]. Существует большое количество алгоритмов, способных отслеживать ТММ. Некоторые из них простые, а некоторые более сложные. В общем случае, методы ТММ можно классифицировать, например, как сделано в работах [7, 8]:

- Первая категория – это методы, основанные на обратной связи по напряжению, которые сравнивают рабочее напряжение PV с опорным напряжением, чтобы генерировать управляющий сигнал широтно-импульсной модуляции преобразователя постоянного тока [9].

- Вторая категория – методы на основе обратной связи по току, которые используют ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля в качестве обратной связи для оценки оптимального тока, соответствующего максимальной мощности [10].

- Третья категория – это тип метода, основанный на измерении мощности, в котором используются итерационные алгоритмы для непрерывного отслеживания ТМР с использованием измерений напряжения и тока фотоэлектрического модуля [11].

Одним из наиболее успешных и используемых методов является метод «возмущение и наблюдение» (P&O) [12]. График выходных параметров каждого фотоэлектрического модуля может быть охарактеризован своим I-V изгибом. Три точки на кривой вольт-амперной ха-

рактеристики (ВАХ) важны для определения производительности фотоэлектрического модуля; точки максимальной мощности, тока короткого замыкания и напряжения холостого хода [13–15].

Целью исследования является изучение стабильности системы, которая позволяет избежать неправильной оценки ее характеристик при изменении освещенности, а также сделать алгоритм более стабильным, чем традиционный алгоритм, и улучшить не только скорость отслеживания, но и точность отслеживания системы.

Математическая модель работы фотоэлектрических генераторов

Мощность, выдаваемая ячейкой, недостаточна для питания нагрузки, нам придется соединить несколько ячеек последовательно и параллельно, чтобы сформировать фотоэлектрический модуль и достичь желаемой мощности. В свою очередь, соединение модулей между собой последовательно и параллельно для получения еще большей мощности определяет понятие фотоэлектрического генератора. Для каждого модуля производитель указывает ток короткого замыкания (I_{cc}) и напряжение холостого хода (V_{oc}) при стандартных условиях ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$). Эквивалентная схема солнечного элемента, основанная на модели с одним диодом, имеет вид на рис. 1 [16].

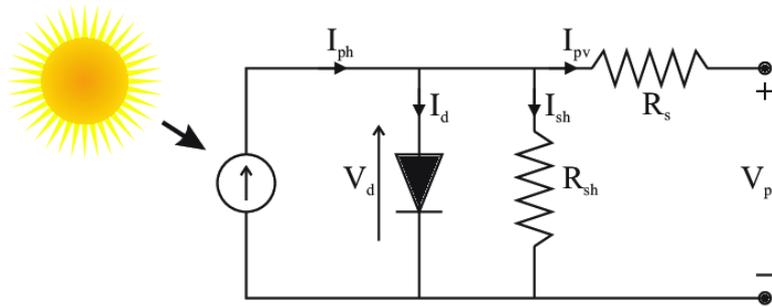


Рис. 1. Эквивалентная схема фотоэлемента

Fig. 1. Equivalent circuit of a photocell

Для проведения эксперимента использовался модуль Delta BST 260-24 P мощностью 260 Вт. Уравнения от (1) до (8) были реализованы в Matlab/Simulink.

$$I = I_{pv} - I_d, \quad (1)$$

$$I_{pv} = [I_{sc} + K_1(T_c - T_r)] \cdot G, \quad (2)$$

$$I_d = I_s \left\{ \exp\left(\frac{q}{AkT_c}\right) - 1 \right\}, \quad (3)$$

$$I = I_{pv} - I_d - I_p, \quad (4)$$

$$I = I_{pv} - I_s \left\{ \exp\left(\frac{q}{AkT_c N_s} V + IR_{se}\right) - 1 \right\} - \frac{V + IR_{se}}{R_p}, \quad (5)$$

$$I = I_{pv} - I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV}{AkT_c N_s} IR_{se}\right) - 1 \right\}, \quad (6)$$

где I_{pv} — световой ток, а I_d — уравнение Шокли; I_{sc} — ток короткого замыкания ячейки при температуре 25 °C и освещенности 1000 Вт/м²; K_1 — температурный коэффициент тока короткого замыкания ячейки; T_c и T_r — рабочая температура ячейки и эталонная температура соответственно. Температуры даны в К, q — заряд электрона [$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл]; k — постоянная Больцмана [$1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К]; A — коэффициент идеальности диода [17]

Значение параллельного резистора ‘Rp’ в уравнении (5) чрезвычайно велико, и им обычно пренебрегают при анализе PV. Эквивалентная схема PV без R_p называется упрощенной моделью.

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{A_k} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_r} \right) \right], \quad (7)$$

где I_{rs} — обратный ток насыщения ячейки при эталонной температуре и солнечном излучении; E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника, используемого в ячейке. E_g примерно равна 1,12 В для поликристаллического Si при 25 °C [18]. Используя уравнение (8), можно рассчитать обратный ток насыщения ячейки I_{rs} при эталонной температуре 25 °C.

$$I_{rs} = \frac{I_{cs}}{\exp \left(\frac{q}{AkT_{c(n)}N_s} V_{oc} \right) - 1}, \quad (8)$$

$$I_s = \frac{I_{cs}}{\exp \left(\frac{q}{AkT_{c(n)}N_s} V_{oc} \right) - 1} \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{A_k} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_r} \right) \right]. \quad (9)$$

Можно подвести итог, что математическая модель работы фотоэлектрических генераторов показывает повышение эффективности работы системы и улучшает качество выходных параметров.

Система точки максимальной мощности

1. Инкрементная проводимость (IC)

Среди всех стратегий ТММ-метод инкрементной проводимости широко используется из-за высокой точности отслеживания при установившихся режимах и хорошей адаптируемости к быстро меняющимся атмосферным условиям. Этот метод использует наклон характеристик мощности массива фотоэлектрических модулей для отслеживания ТММ. Алгоритм INC ТММ зависит от dP/dV , что эквивалентно нулю для целей ТММ. Было предложено повысить точность отслеживания и динамическое выполнение в быстро меняющихся условиях. Блок-схема алгоритма

INC показана на рис. 2. Алгоритм начинается с цикла, находя значение $V(t)$ и $I(t)$ в момент времени t . Сравнивая мгновенную проводимость с INC, отслеживается ТММ. На основе сравнения выходного сигнала регулируется управляющее напряжение (V_{ref}). Соответствующее уравнение, используемое в этом методе, подробно описано. Преимущество INC заключается в лучшей работе в быстро меняющихся климатических условиях и, кроме того, обеспечивает меньшие колебания вокруг ТММ. Следовательно, эффективность INC для достижения ТММ примерно выше, чем у метода P&O [19–21].

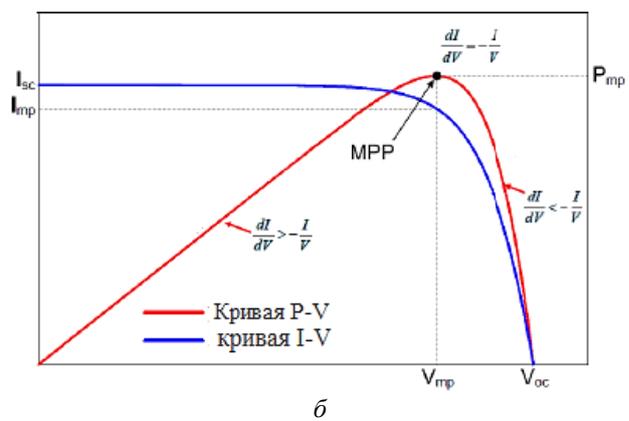
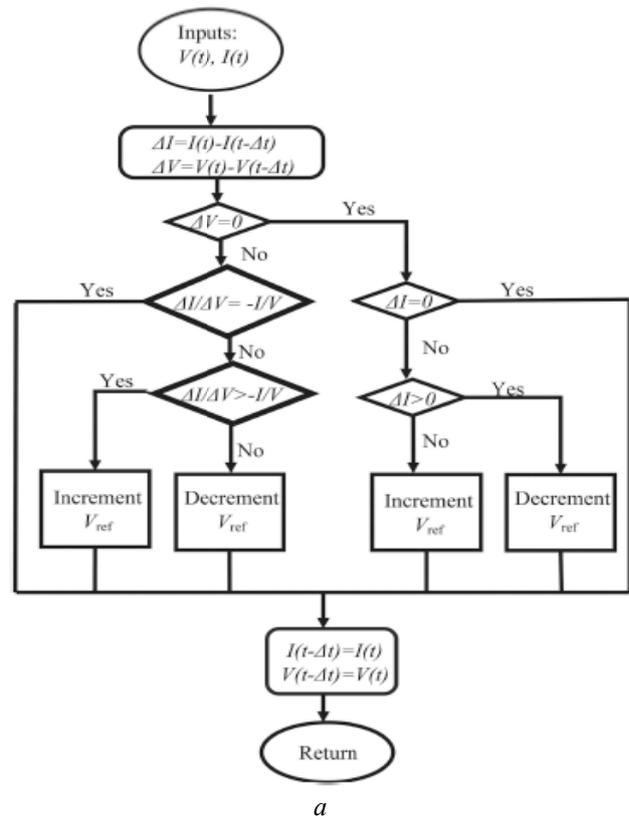


Рис. 2. Блок-схема алгоритма: а – блок-схема метода ТММ инкрементная проводимость (IC); б – кривая P-V фотоэлектрического модуля

Fig. 2. Block diagram of the algorithm: a – Block diagram of the MPPT method (IC); b – P-V curve of a PV module

Уравнение (10) показывает, что фотоэлектрический модуль работает на ТММ. Между тем уравнение (11) показывает, что фотоэлектрический модуль работает на левой стороне ТММ, тогда как уравнение (12) показывает, что фотоэлектрический модуль работает на правой стороне ТММ на кривой $P-V$ [22].

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, \quad (10)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, \quad (11)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}. \quad (12)$$

2. Предлагаемый алгоритм инкрементной проводимости

Алгоритм инкрементной проводимости зависит от наклона кривой $P-V$, то есть в основе алгоритма IC лежит наклон кривой $P-V$, где dV и dI – изменения напряжения и тока, которые напрямую определяются сопротивлением нагрузки и зависят от солнечного излучения. В результате алгоритм должен учитывать влияние потока солнечной радиации, изменения нагрузки,

тока и напряжения фотоэлектрического модуля. Как показано на рис. 3, когда фотоэлектрическая система работает на линии нагрузки II (точка F) и резко увеличивается солнечное излучение, рабочая точка фотоэлектрической системы перемещается в точку G . Следовательно, увеличиваются как напряжение, так и ток. И наоборот, когда фотоэлектрическая система работает на линии нагрузки I (точка E) и солнечное излучение внезапно уменьшается, рабочая точка фотоэлектрической системы перемещается в точку H . Таким образом, и напряжение, и ток уменьшаются.

В обычном алгоритме инкрементальной проводимости эти два типа изменений не учитываются. Между тем, если фотоэлектрическая система работает на линии нагрузки I и сопротивление нагрузки увеличивается, фотоэлектрическая система будет переходить на линию нагрузки II, следовательно, напряжение фотоэлектрического модуля увеличивается, а ток фотоэлектрического модуля будет уменьшаться. В качестве альтернативы напряжение может уменьшаться, а ток увеличиваться, когда сопротивление нагрузки уменьшается.

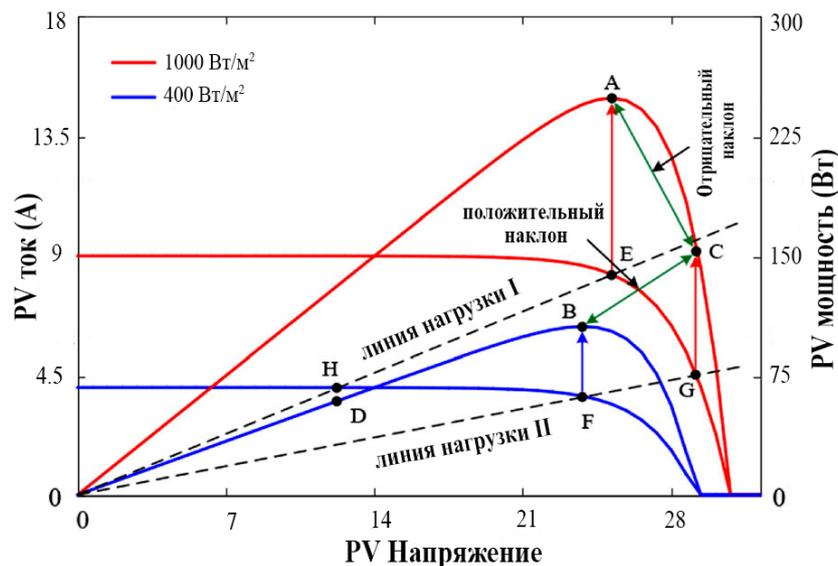


Рис. 3. ВАХ и P-V кривые облучения 1000 Вт/м^2 и 400 Вт/м^2

Fig. 3. I-V and P-V curves for irradiation at 1000 W/m^2 and 400 W/m^2

Результаты моделирования

Модифицированный алгоритм IC обеспечивает отбор мощности при увеличении как напряжения, так и тока по мере увеличения солнечной энергии. Отсюда следует, что при проверке того, достигнута ли ТММ и увеличиваются ли напряжение и ток, может быть обнаружено неожиданное увеличение солнечной энергии. Соответ-

ственно, допустимая ошибка в уравнении (13) принимается для определения того, достигнут ли подход ТММ.

$$\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| < 0,065. \quad (13)$$

Предложенная методика подтверждается при применении усовершенствованного алгоритма IC , реализованного путем разделения P - V характеристики на три области, обозначаемые как область A , область B и область C , где область A составляет от 0 до 65 % V_{oc} , область B составляет от 65 % V_{oc} до 85 % V_{oc} , а область C составляет от 85 % V_{oc} до V_{oc} . Область B – это область, включающая ТММ. Понятно, что усовершенствованный алгоритм IC должен найти ТММ только в пределах области B , которая колеблется от 65 до 85 %. Кривая PV была разделена на три области, чтобы сократить затраты и время на поиск ТММ.

Кроме того, мы можем сказать, что предложенный метод проверен, а также аддитивный поиск проверяет, была ли достигнута точка мак-

симальной мощности (ТММ), используя уравнение (13). При этом если алгоритм устанавливает V_{ar} равным 1, тогда, уравнение (13) выполняется, а если V_{ar} равно нулю, то нет. Предложенный метод также проверяет, были ли увеличены напряжение и ток. В результате рабочий цикл увеличивается, а не уменьшается, как в случае с традиционным подходом. В результате обновления алгоритма IC был устранен неправильный выбор, получающийся при использовании традиционного алгоритма. Это значит, что система ТММ временно устанавливает ток фотоэлектрической панели на ноль в усовершенствованном алгоритме IC , позволяя измерять напряжение холостого хода панелей. Блок-схема на рис. 4 описывает работу модифицированного алгоритма IC .

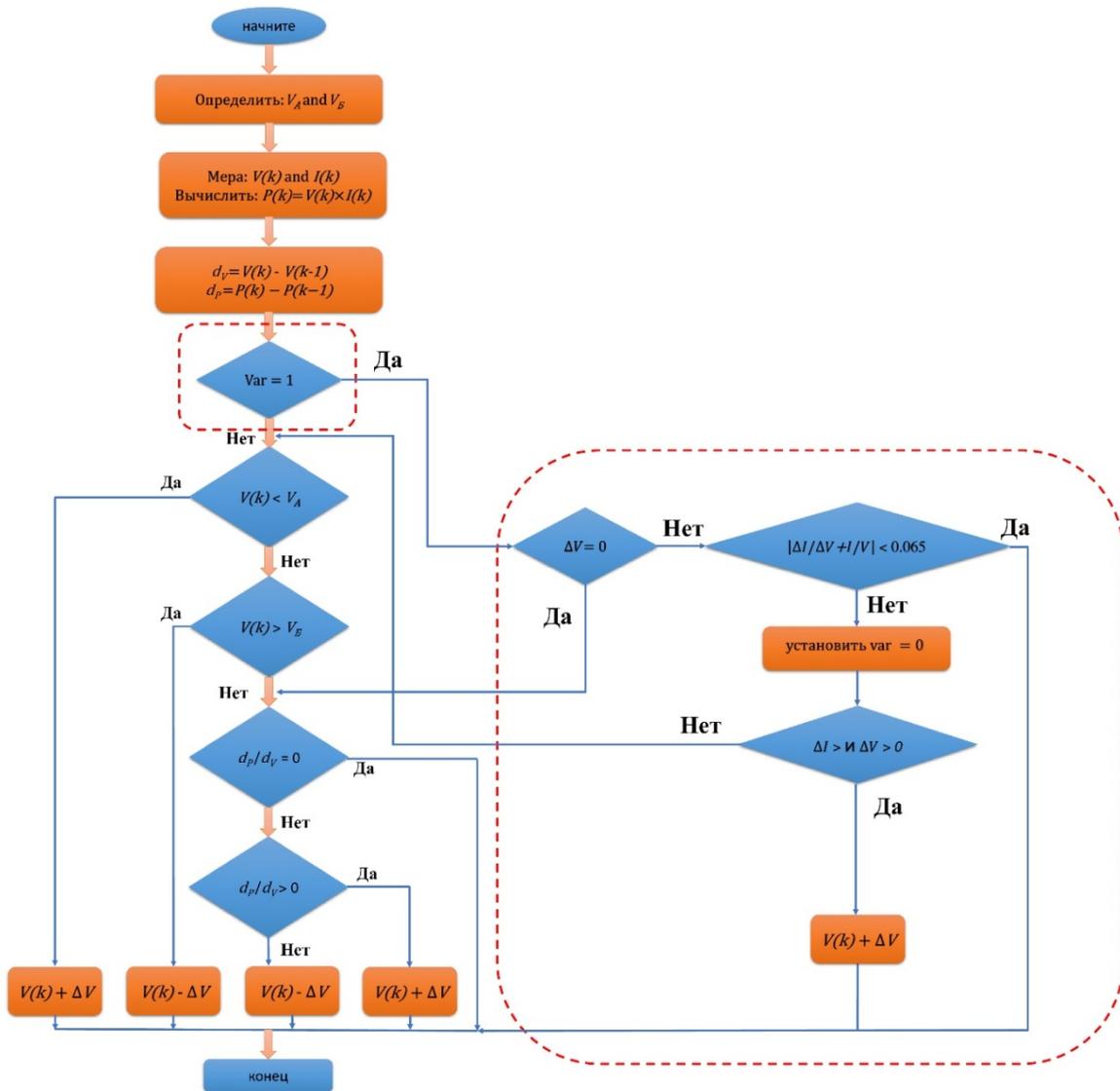


Рис. 4. Блок-схема предлагаемого инкрементного алгоритм проводимости

Fig. 4. Block diagram of the proposed incremental conduction algorithm

Для подтверждения теоретических результатов была проведена серия опытов, при которых были смоделированы процессы, происходящие при работе солнечных электроустановок в натуральных условиях. При проведении опытов были использованы кремниевые фотоэлектрические батареи марки Delta BST 260-24 P, расположенные на экспериментальном полигоне лаборатории возобновляемой энергетики Севастопольского государственного университета. В процессе проведения экспериментов изменялись режимы работы солнечных батарей, связанные с резким изменением падения потока солнечной радиации (до 50 %) на рабочую поверхность солнечных панелей, а также изменения температуры рабочих поверхностей панелей из-за изменения нагрева за счет прохождения облаков. Освещенность и температура нагрева фиксировались измерительными приборами (люксметрами и пирометрами).

Тест был проведен для традиционных и предлагаемых методов с использованием среды Matlab / Simulink для фотоэлектрических солнечных панелей Delta BST 260-24 P.

В первой серии опытов солнечная радиация внезапно увеличивалась с 250 Вт/м^2 , 500 Вт/м^2 , 750 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 , за время $t = 1,5 \text{ с}$, 3 с , $4,5 \text{ с}$, 6 с , а затем падала до 250 Вт/м^2 за время с 6 до $7,5 \text{ с}$, при постоянной температуре $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 5 показано сравнение результатов испытаний по обычному методу IC и результатов испытаний по предлагаемой методике.

Во второй серии опытов происходило увеличение солнечной радиации и температуры соответственно, при повышении температуры до $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $35 \text{ }^\circ\text{C}$, $45 \text{ }^\circ\text{C}$ и падении до $20 \text{ }^\circ\text{C}$, при таком же изменении солнечной радиа-

ции, как и в первом состоянии. На рис. 6 показано сравнение результатов испытаний по обычному методу IC и результатов испытаний по предлагаемой методике.

Как видно из этих рисунков, при использовании предложенного алгоритма допускается погрешность 0,065. В отличие от традиционного алгоритма, стационарные колебания сведены к минимуму, а мощность колеблется, что может привести к потере фотоэлектрического преобразования энергии. При использовании традиционного алгоритма, как показано на рис. 5 и 6, при резком увеличении солнечной радиации мощность увеличивается на величину более $255,5 \text{ Вт}$. При этом, в то время как обычный метод IC меняет направление, мощность отклоняется на величину не менее 234 Вт , и из-за неправильного решения традиционной технологии системе требуется много времени, чтобы достичь ТММ, даже при достижении MPP, как показано на рис. 5 и 6. С другой стороны, предлагаемая технология обнаруживает быстрое увеличение излучения и принимает правильное решение с точки зрения рабочего цикла. В результате мощность с первого шага сходится к новой ТММ и удерживается там. Более того, для достижения ТММ требуется всего $0,001$ секунды. Следовательно, мощность сходится быстрее с предлагаемым IC-методом по сравнению с традиционным алгоритмом, который требует больше времени для достижения ТММ. Как показано, предлагаемый метод показывает очень высокую скорость отслеживания, незначительные колебания вокруг ТММ и более высокую эффективность по сравнению с другими методами.

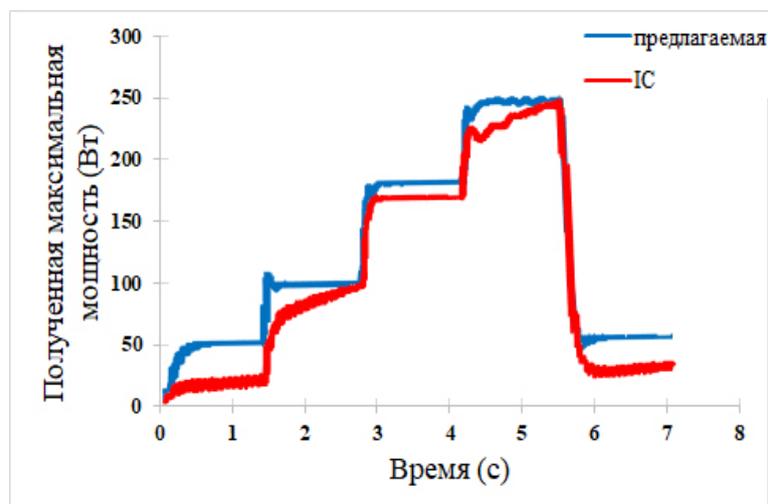


Рис. 5. Сравнение улучшенного алгоритма IC и алгоритма IC с различными облучениями для определения ТММ

Fig. 5. Comparison between IC improved algorithm and IC algorithm with various irradianations to determine MPPT

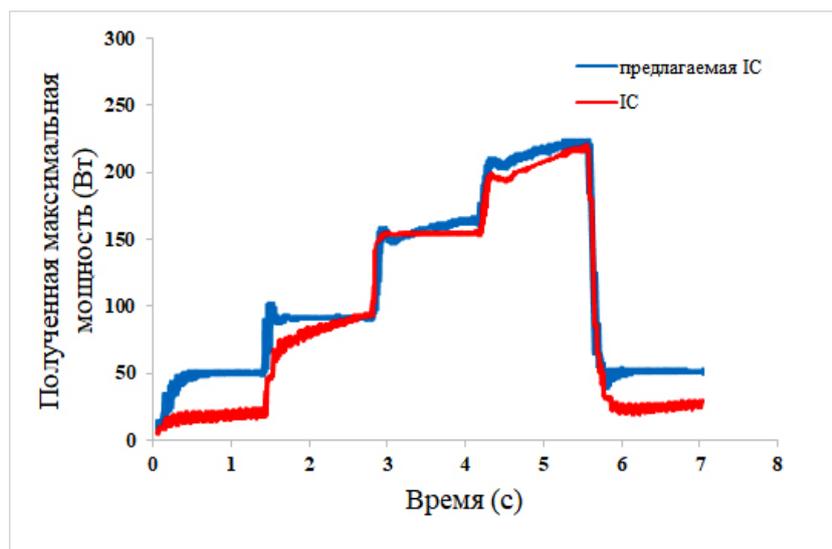


Рис. 6. Сравнение улучшенного алгоритма IC и алгоритма IC с различной температурой и различным облучением для определения ТММ

Fig. 6. Comparison between IC improved algorithm and IC algorithm with different temperature and different irradiation to determine MPPT

Результаты экспериментов

Вся система состоит из фотоэлектрической панели Delta BST 260-24P, контроллера PIC16F1789, повышающего преобразователя и нагрузки. Контроллер PIC16F1789 запрограммирован с использованием обычного алгоритма инкрементальной проводимости и предложенного для генерации подходящей широтно-импульсной модуляции, управляющей рабочим

циклом. Результаты эксперимента были получены непосредственно под потоком прямой солнечной радиации 12 октября 2021 г. (с 10 ч 39 мин до 12 ч 35 мин), как показано на осциллографе рис. 7. В этот день солнечное излучение и температура окружающей среды составляли: $644,36 \text{ Вт/м}^2$; $20,4 \text{ }^\circ\text{C}$ в 10 ч 44 мин и $690,97 \text{ Вт/м}^2$; $23,56 \text{ }^\circ\text{C}$ в 12 ч 35 мин.



Рис. 7. Экспериментальные результаты для напряжения PV: 1 – обычный алгоритм IC, 2 – предложенный алгоритм IC

Fig. 7. Experimental results for PV voltage: 1 - conventional IC algorithm, 2 - proposed IC algorithm

Экспериментальные результаты ясно показывают, что ожидаемые цели работы были достигнуты, также демонстрируют эффективность предложенного алгоритма IC, а также показы-

вают высокую скорость схождения к ТММ и уменьшение пульсаций. Эти улучшения видны на качестве напряжения на рис. 7. На рис. 8 предложение допускает меньшие пульсации то-

ка по сравнению с традиционной технологией ИС. Замечено, что время отклика традиционного алгоритма ИС слишком велико по сравнению с адаптивным рабочим циклом модифицированного алгоритма ИС, как показано на рис. 7. Таким образом, предложение предлагает большее время отклика и меньше пульсаций напряжения. В результате предложенная методика позволяет

уменьшить колебания вокруг ТММ. Это демонстрирует эффективность предложенного алгоритма, позволяющего снизить потери энергии. Таким образом, использование адаптивного рабочего цикла преобразователя обеспечивает более быструю сходимость к целевому ТММ с меньшей ошибкой относительно предоставленной фотоэлектрической мощности.

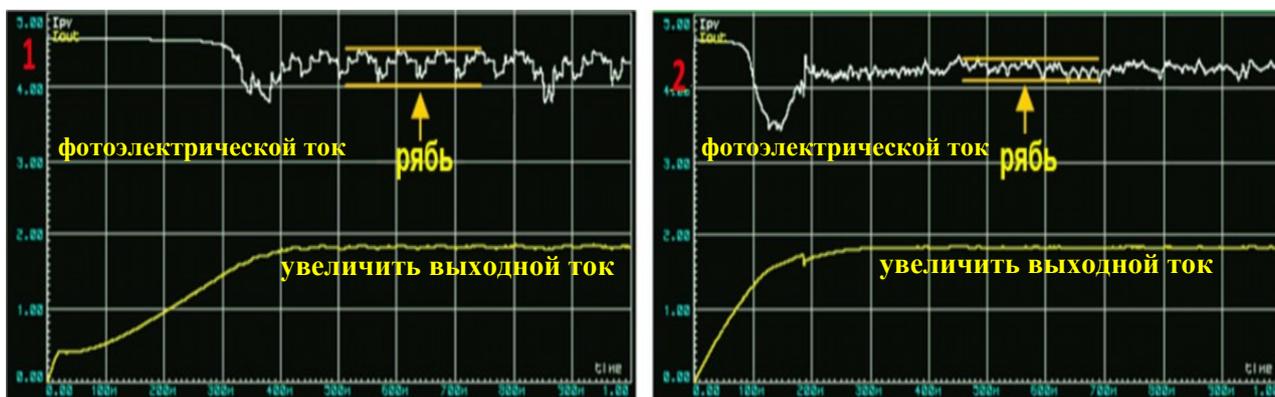


Рис. 8. Экспериментальные результаты для тока PV: 1 – обычный алгоритм ИС, 2 – предложенный алгоритм ИС
Fig. 8. Experimental results for PV current: 1 - conventional IC algorithm, 2 –proposed IC algorithm

Заключение

В этой статье предлагается алгоритм инкрементной проводимости для отслеживания ТММ фотоэлектрического модуля при быстро меняющемся уровне потока солнечного излучения. Приводятся недостатки, с которыми сталкивается традиционный алгоритм, и предлагаются модификации для смягчения неточных ответов. По сравнению с текущим состоянием исследований структура системы управления предлагаемого алгоритма является более простой, стабильной и может точнее реагировать и отслеживать ТММ.

Это повышает стабильность системы и позволяет избежать неправильной оценки при изменении освещенности. Результаты моделирования подтверждают, что алгоритм более стабилен, чем традиционный алгоритм, и улучшает не только скорость отслеживания, но и точность отслеживания системы. Предлагаемый алгоритм имеет структуру, аналогичную традиционному методу, и для его реализации не требуется никаких дополнительных аппаратных средств. Таким образом, его можно легко реализовать с помощью недорогого микроконтроллера, что увеличивает производительность.

Этот метод контроля электрических параметров можно использовать в реальных фотоэлектрических системах генерации электроэнергии. Более того, при использовании модифицированного алгоритма практически не учитываются установившиеся колебания, за счет этого потери

энергии сводятся к минимуму, отсюда выработка мощности фотоэлектрическими панелям и составляет до 98,3 % от номинала вместо 94 %, получаемых по традиционной методике. Результаты моделирования и эксперимента показали, что предложенный алгоритм и отслеживает ТММ.

При использовании предложенного алгоритма эффективность фотоэлектрической системы гораздо выше, в сравнении с обычным алгоритмом, т. к. он гораздо точнее контролирует параметры, в результате мощностные потери сокращаются, а выработка электрической энергии увеличивается.

Библиографические ссылки

1. Javed, K.; Ashfaq, H.; Singh, R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.
2. Pathak, P. K., Padmanaban, S., Yadav, A. K., Alvi, P. A., & Khan, B. Modified incremental conductance MPPT algorithm for SPV-based grid-tied and stand-alone systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16 (4), pp.776-791.
3. Mehrjerdi, H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 2020, 156, 183-192.
4. Shaw, R. N., Walde, P., & Ghosh, A. IOT based MPPT for performance improvement of solar PV arrays operating under partial shade dispersion. In 2020 IEEE

9th Power India International Conference (PIICON), 2020, pp. 1-4.

5. Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.

6. Darwesh, M. R., & Ghoname, M. S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021, 7, pp. 1657-1671.

7. 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. DOI 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113.

8. Zhang Q., Ning Xu., Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method. *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.

9. Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы с использованием среды matlab/simulink / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, К. А. Али, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 21 (73). С. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2021-21-97-105>.

10. Belkaid, A.; Colak, I.; Kayisli, K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.* 2017, 99, pp. 839–846.

11. Abo-Elyousr, F.K.; Abdelshafy, A.M.; Abdelaziz, A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379–400.

12. Bhukya, M. N., & Kota, V. R. A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(3), pp. 869-884.

13. Aouchiche, N.; Aitcheikh, M.S.; Becherif, M.; Ebrahim, M.A. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy* 2018, 171, 593–603.

14. Pathy, S.; Subramani, C.; Sridhar, R.; Thentral, T.; Padmanaban, S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies* 2019, 12, 1451. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2019, 132, pp. 518-537.

15. H. Li, D. Yang, and W. Su, "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 265–275, 2018.

16. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley & Sons, 2016.

17. Ram, J. Prasanth, T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp. 826-847.

18. Haddad, Ahmad, Mohamad Ramadan, Mahmoud Khaled, Haitham S. Ramadan, and Mohamed Becherif. "Triple hybrid system coupling fuel cell with wind turbine and thermal solar system." *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45, pp. 11484-11491.

19. Pilakkat, Deepthi, and S. Kanthalakshmi. "An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions." *Solar Energy* 178, 2019, pp. 37-47.

20. Layth M. Abd Ali, L M., Ali, Q. A., Klačková, I., Issa, H. A., Yakimovich, B. A. and Kuvshinov, V. (2021) Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 26 (4), pp. 773-783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>.

21. Mitrofanov, S. V., Baykasenov, D. K., & Suleev, M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In *2018 International Ural Conference on Green Energy*, 2018, pp. 90-96.

22. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, М. Н. Аль-Малики, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25 (77). С. 75–85.

References

1. Javed, K.; Ashfaq, H.; Singh, R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.

2. Pathak, P. K., Padmanaban, S., Yadav, A. K., Alvi, P. A., & Khan, B. Modified incremental conductance MPPT algorithm for SPV-based grid-tied and stand-alone systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16(4), pp. 776-791.

3. Mehrjerdi, H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 2020, 156, 183-192.

4. Shaw, R. N., Walde, P., & Ghosh, A. IOT based MPPT for performance improvement of solar PV arrays operating under partial shade dispersion. In *2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON)*, 2020, pp. 1-4.

5. Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.

6. Darwesh, M. R., & Ghoname, M. S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for

heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021, 7, pp.1657-1671.

7. Abdali L.M., Issa H. A., Аль-Малики М. Н., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Analysis Study and Comparison of Different Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic Systems]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022. Vol. 20, no. 3. Pp. 104-113 (in Russ.). Doi: 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113.

8. Q. Zhang, Xu. Ning, and Z. Ye, "MPPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method," *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.

9. Abdali L.M., Issa H.A., Ali Q.A., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. [Analysis and simulation off-grid pv panels by using matlab simulink environment]. *Construction and industrial safety*. 2021. No. 21. Pp. 97-105 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2021-21-97-105>.

10. Yin, O.W. and B.C. Babu, Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018. 169: p. 48-61.

11. Abo-Elyousr, F.K.; Abdelshafy, A.M.; Abdelaziz, A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379–400.

12. Bhukya, M. N., & Kota, V. R. A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(3), pp.869-884.

13. Aouchiche, N.; Aitcheikh, M.S.; Becherif, M.; Ebrahim, M.A. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy* 2018, 171, 593–603.

14. Pathy, S.; Subramani, C.; Sridhar, R.; Thentral, T.; Padmanaban, S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies* 2019, 12, 1451. Senol M., Abbaso~ glu S.,

Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2019, 132, pp. 518-537.

15. H. Li, D. Yang, and W. Su, "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 265–275, 2018.

16. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley & Sons, 2016.

17. Ram, J. Prasanth, T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp.826-847.

18. Haddad, Ahmad, Mohamad Ramadan, Mahmoud Khaled, Haitham S. Ramadan, and Mohamed Becherif. "Triple hybrid system coupling fuel cell with wind turbine and thermal solar system." *International Journal of Hydrogen Energy* ,2020, 45, pp. 11484-11491.

19. Pilakkat, Deepthi, and S. Kanthalakshmi. "An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions." *Solar Energy* 178, 2019, pp. 37-47.

20. Layth M. Abd Ali, L. M., Ali, Q. A., Klačková, I., Issa, H. A., Yakimovich, B. A. and Kuvshinov, V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, 2021, Volume 26 (4), 773-783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>

21. Mitrofanov, S. V., Baykasenov, D. K., & Suleev, M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In *2018 International Ural Conference on Green Energy*, 2018, (pp. 90-96). IEEE

22. Abdali L.M., Issa Kh.A., Al'-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., & Bekirov E.A. [Study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2022. No. 25. Pp. 75-85 (in Russ.).

Maximum Power Point Tracking Method Application to Increase the Efficiency of Photovoltaic Installations

L. M. Abdali, Postgraduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

M. N. Al-Maliki, Postgraduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

H. A. Issa, Postgraduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

B. A. Yakimovich, DrSc in Engineering, Professor, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V. V. Kuvshinov, PhD I Engineering, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Photovoltaic systems using boost converters based on the traditional incremental conduction method have delayed convergence dynamics to the maximum power point (MPP). This article presents a simulation and hardware imple-

mentation of a variable step size MPPT with automatic scaling at low cost and low power consumption. The production of photovoltaic energy is highly dependent on weather and environmental conditions such as temperature and solar radiation. Due to any change in the external environment and the only control condition, the response of the first step of the working cycle of the converter of the traditional incremental conduction MPPT algorithm is not accurate, resulting in an incorrect estimate.

Furthermore, this study clarifies the usual technique and presents a modified incremental conductance approach that appropriately responds as solar radiation levels rise. In order to improve the economy and efficiency of photovoltaic systems, we proposed an improved incremental conduction algorithm for the MPP control strategy. This technique is simpler in structure than the classic incremental conduction algorithm, and it can assign immediate increments of power, voltage, and current as the environment changes, as well as increase tracking performance.

The MATLAB/Simulink program runs under conditions of rapidly changing solar radiation levels, and the results of the enhanced and conventional incremental conductance algorithm are compared. The results show that the proposed algorithm can effectively detect erroneous judgments and prevent their occurrence. This not only optimizes the system, but also improves the efficiency, response speed, and tracking efficiency of the PV system, thus ensuring the stable operation of the power system.

Keywords: solar radiation, photovoltaic cell, photovoltaic module, MPPT, improved incremental conductivity.

Получено: 26.09.22

Образец цитирования

Абдали Л. М., Аль-Малики М. Н., Исса Х. А., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения эффективности работы фотоэлектрических установок // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Том 20, № 4. С. 106–116. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116.

For Citation

Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Issa Kh.A., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Using the Maximum Power Point Tracking Method to Increase the Efficiency of Photovoltaic Installations]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 106-116 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116.