

УДК 620.92

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-4-15

**Сравнение методов управления при использовании алгоритмов возмущения и наблюдения и нечеткой логики для контроля точки максимальной мощности в фотоэлектрических системах**

**К. А. Али**, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Л. М. Абдали**, аспирант, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

**Н. В. Коровкин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Б. А. Якимович**, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

**В. В. Кувшинов**, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*В настоящее время фотоэлектрическое преобразование энергии получило колоссальное развитие в мировой энергетической промышленности. Огромные мощности солнечных станций генерируют электрическую энергию по всему миру. Сотни гигаватт электрической энергии поступают в сети различных государств мира по всему земному шару. Более того, каждый год до сотни гигаватт установленной мощности солнечных электростанций вводится в эксплуатацию. И такая тенденция наблюдается на протяжении последних десятилетий. Основная проблема солнечного фотоэлектрического преобразования – непостоянство потока солнечной радиации, связанное с климатическими условиями в регионах, где эксплуатируются фотоэлектрические станции. Эту проблему можно решить, используя высокоэффективные методы управления генерацией солнечных электрических станций, в частности такие, как использование информационных систем управления для конкретной фотоэлектрической системы с целью повышения конечной выработки электрической энергии, поставляемой потребителю.*

*Фотоэлектрическое преобразование потока солнечной радиации является важным возобновляемым источником энергии. Из-за разной интенсивности Солнца электричество, вырабатываемое фотоэлектрическими панелями непосредственно из потока радиации, непостоянно. В настоящее время в фотоэлектрической системе используется отслеживание точки максимальной мощности в режиме возмущения и наблюдения для увеличения конечной выходной мощности фотоэлектрических панелей. Понижающий DC-DC-преобразователь позволяет точке максимальной мощности изменять рабочее фотоэлектрическое напряжение и определять максимальную выходную мощность фотоэлектрической панели.*

*В данном исследовании предлагается реализация нечеткой логики. Величина возмущенного напряжения определяется изменением мощности  $dq$  и изменением мощности относительно изменения напряжения  $dq/dv$  нечетко. В целях оптимизации точки максимальной мощности исследуется производительность нечеткой логики. Нечеткая логика может упростить отслеживание максимальной мощности и снизить нестабильность напряжения. Согласно результатам моделирования метод точки максимальной мощности на основе нечетких вычислений работает лучше, чем традиционный метод вычисления. При использовании предложенных методов можно значительно повысить выработку электрической энергии и увеличить эффективность использования фотоэлектрического преобразования.*

**Ключевые слова:** нечеткое управление, понижающий преобразователь, точка максимальной мощности (ТММ), зарядное устройство для солнечных батарей, фотоэлектрическая система.

**В**ведение  
последнее время многие страны мира уделяют большое внимание развитию возобновляемой энергетики на фоне истощения запасов ископаемого топлива в бли-

жайшем будущем. Возобновляемая энергия означает, что плотность энергии такая же высокая, как у ископаемого топлива, или выше, а чистая энергия не выделяет никаких загрязняющих веществ, таких как азотистые соединения, суль-

фатные соединения и пыль [1]. Основным способом захвата солнечной энергии является фотоэлектрический эффект. Фотоэлектрический эффект возникает, когда луч ультрафиолетового света, состоящий из фотонов, попадает на одну часть пары отрицательно заряженных металлических пластин. Это заставляет электроны освободиться от отрицательно заряженной пластины, и свободные электроны притягиваются к другой пластине электростатическими силами. Освобождение от электрического заряда позволяет улавливать световую энергию в виде электрического тока. Фотоэлектрические батареи преобразуют солнечный свет в электричество [2–4] с некоторым коэффициентом преобразования. Генерируемая мощность постоянного тока зависит от солнечной освещенности и температуры окружающей среды, которые являются переменными. Она также варьируется в зависимости от количества энергии. При однородном излучении и температуре вольтамперная характеристика фотоэлектрического массива (системы) определяется уникальной точкой, называемой точкой максимальной мощности, в которой массив фотоэлектрических модулей обеспечивает максимальную выходную мощность [5]. Чтобы обеспечить максимальную мощность для нагрузки, для массива фотоэлектрических модулей необходим алгоритм отслеживания точки максимальной мощности (ТММ). Алгоритм ТММ управляет преобразователями для непрерывного определения мгновенной максимальной мощности системы фотоэлектрических модулей [6].

Данная исследовательская работа предлагает стратегию управления питанием с использованием контроллера нечеткой логики для фотоэлектрической системы, подключенной к сети, путем планирования и управления потоком энергии между фотоэлектрическими батареями, аккумуляторными батареями и сетью [7–9].

Фотоэлектрическую энергию можно использовать для зарядки аккумулятора, подачи нагрузки, а также для извлечения чистой мощности. Аналогичным образом заряд батареи можно использовать как для загрузки, так и для отправки обратно в сеть [10]. Эффективная работа обеспечивает высококачественную связь между фотоэлектрическими, сетевыми и аккумуляторными накопителями [11].

**Цель** исследования – представление нового метода, основанного на нечетком логическом контроллере, для достижения максимальной мощности отслеживания точки максимальной мощности.

Предлагаемый метод основан на изменении напряжения и тока фотоэлектрической системы.

### Моделирование массива фотоэлектрических модулей

Фотоэлектрические системы являются нелинейными устройствами. Их параметры зависят от солнечной энергии и температуры. Солнечный свет преобразуется в электричество фотоэлементами. Фотоэлектрические массивы состоят из параллельных и последовательных фотоэлементов [12–14]. Для формирования панелей или модулей ячейки группируются вместе. Не только нагрузка постоянного тока может питаться напряжением и током, вырабатываемыми на клеммах фотоэлектрического модуля, но они также могут быть подключены к инвертору для получения переменного тока [15]. Модели фотоэлектрических элементов долгое время использовались исследователями и профессионалами для описания поведения полупроводниковых преобразователей. Модель схемы с одним диодом является одной из наиболее распространенных моделей, которые используются для прогнозирования выработки энергии в фотоэлементах (рис. 1) [16].

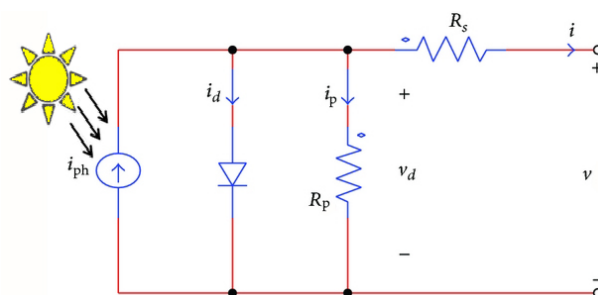


Рис. 1. Эквивалентная схема солнечного элемента

Fig. 1. Equivalent scheme of a solar cell

Эквивалентная схема солнечного элемента состоит из управляемого источника тока, диода, последовательного сопротивления ( $R_s$ ) и шунтирующего сопротивления ( $R_p$ ). Антипараллельный диод модифицируется на внешний управляемый источник тока, который размещается антипараллельно исходному источнику [17].

Согласно действующему закону Кирхгофа

$$I = I_{ph} - I_d - I_p; \quad (1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q(v+IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{RP}, \quad (2)$$

где  $I_{ph}$  – фототок или энергетическая освещенность, линейно изменяющаяся в зависимости

сти от излучения при определенной температуре ячейки;  $I_0$  – ток насыщения встречно-параллельного диода;  $K$  – постоянная Больцмана ( $K = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $n$  – коэффициент идеальности, или коэффициент излучения.

При соединении ячеек в фотоэлектрическом модуле последовательно имеем следующее уравнение [18]:

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q(v+IRs)}{Ns nKT}} - 1 \right] - \frac{V + INs Rs}{NPRP}, \quad (3)$$

где  $Ns$  – количество ячеек, соединенных последовательно.

Модель фотоэлектрической системы была разработана в Matlab Simulink на основе эквивалентной схемы, представленной на рисунке 1.

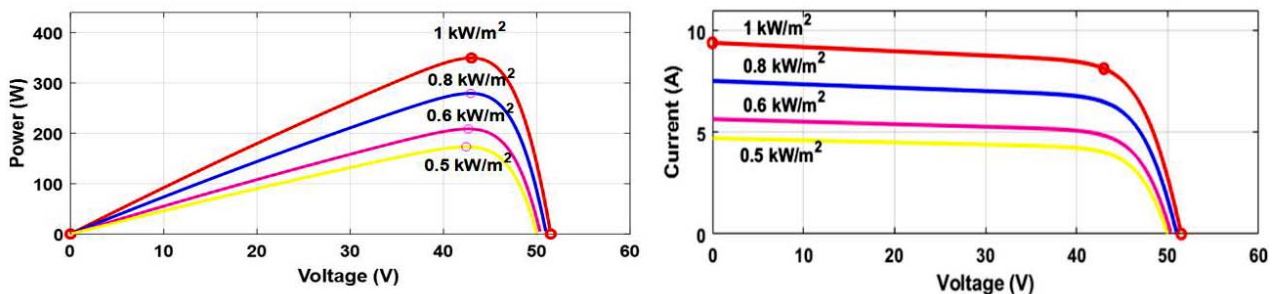


Рис. 2. Характеристики  $I - V$  и  $V - P$  в стандартных условиях

Fig. 2. The  $I - V$  and  $V - P$  characteristics in standard conditions

Алгоритм управления точкой максимальной мощности (ТММ) обычно применяется для управления преобразователем постоянного тока, который представлен в схеме ТММ. Одним из самых популярных алгоритмов ТММ является метод Р&О (возмущения и наблюдения), однако недостатком этого метода является проблема сходимости и возникновение колебаний в определенных точках во время отслеживания.

#### Техника отслеживания точки максимальной мощности

Для непрерывного отслеживания ТММ в системе преобразования мощности используется метод ТММ, представляющий собой электронную систему, принцип работы которой заключается в подаче соответствующего рабочего цикла  $D$  в систему преобразования мощности для выхода фотоэлектрической батареи в виде тока и напряжения и/или входов солнечного излучения и температуры. Этот рабочий цикл преобразуется в сигнал схемой драйвера затвора для регулировки работы системы преобразования энергии. Оптимальный рабочий цикл зависит от положения рабочей точки на кривой  $PV$ .

В этом случае  $I_{ph}$  является входным параметром, применяемым к источнику тока, и его можно оценить с помощью отношения  $I - V$  массива (рис. 2), указанного в приведенном выше уравнении [19].

#### Конфигурация системы и методы

Конфигурация системы, используемая в этой работе, показана на рисунке 3. Напряжение и ток, генерируемые фотогальванической системой, преобразуются понижающим преобразователем для адаптации к характеристикам батареи или нагрузки. Значение рабочего цикла понижающего преобразователя регулируется напряжением и током управляемого фотоэлектрического элемента с помощью ТММ на основе контроллера нечеткой логики (НЛУ) для получения максимальной мощности [20].

Существует множество методов ТММ, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Есть несколько вопросов, которые необходимо учитывать при поиске наилучшего метода, включая стоимость, эффективность, потери энергии и тип реализации [21].

Методы ТММ можно разделить на две группы: традиционные (метод инкрементной проводимости (ИП), метод возмущения и наблюдения) и так называемые развивающиеся методы – методы, основанные на интеллекте (метод ТММ на основе нечеткого логического управления (НЛУ) и искусственная нейронная сеть (ИНС)). Эти методы имеют свои недостатки, такие как сложность использования и высокая стоимость. В традиционных методах [22] алгоритм ИП способен откликаться на быстрые колебания солнечной радиации с большой степенью точности. Сложность и высокая цена реализации этого метода являются исключительно усложняющими факторами. В другом классическом алгоритме (Р&О) хороши простота его структуры и простота реализации, но и этот алгоритм не лишен определенных недостатков. Основным

его недостатком является неспособность адаптироваться к быстро меняющимся атмосферным условиям, кроме того, происходит потеря мощности из-за введенных постоянных вариаций

возмущений. Также в методах ИП и P&O обычно требуется два датчика для измерения напряжения и тока модуля, что приводит к увеличению потерь мощности [23].

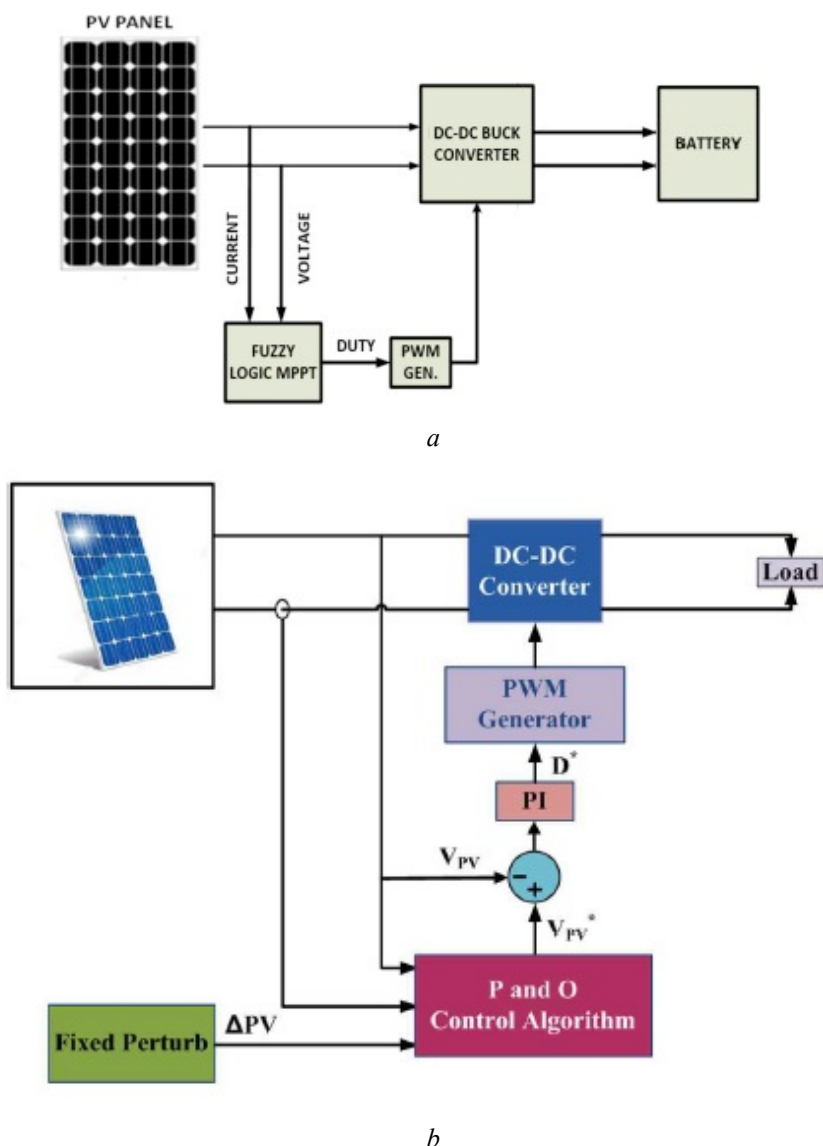


Рис. 3. Блок-схема фотоэлектрической системы ТММ: а – НЛУ; б – P&O

Fig. 3. Block diagram of the TMM photovoltaic system: a - НЛУ; b - P&O

Что касается второй группы, которая называется развивающимися методами, или методами, основанными на интеллекте, которые более эффективны, чем традиционные методы, то методы ИНС и нечеткого логического управления (НЛУ) имеют более быструю сходимость и не показывают колебаний в ТММ. Эти методы хорошо показали себя при зависимости работы солнечных систем при изменяющихся атмосферных условиях. Из предыдущих исследований ясно, что метод НЛУ подходит для управления ТММ для фотоэлектрических систем, потому что надежен, сравнительно прост в по-

строении и не требует знания точной фотоэлектрической модели. Метод НЛУ также подходит для нелинейного управления и обладает большей стабильностью, что является хорошим результатом для увеличения срока службы батареи. Кроме того, НЛУ не использует сложную математику [24]. Метод ИНС – это более быстрый метод отслеживания, но для повышения точности отслеживания требуется огромное количество данных (для его применения). Он использует динамическое облучение и температуру в качестве входных данных и сохраняет их в виде наборов данных [25]. Эти два метода ра-

ботаю быстрее из-за их мгновенного обновления диапазона поиска. Их эффективность отслеживания, а также скорость отслеживания очень высоки. Недостатки ИНС и НЛУ – это сложность, высокая стоимость и необходимость периодической настройки [26].

#### Метод возмущения и наблюдения

Метод возмущения и наблюдения (P&O) является альтернативным методом определения точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля. При его использовании фиксируется напряжение, ток и мощность фотоэлектрического модуля.

Метод P&O работает следующим образом. Система возмущается за счет увеличения или уменьшения рабочего напряжения массива и наблюдения за его влиянием на выходную мощность, как показано на рисунке 4. Измеряются  $V$  и  $I$  для расчета текущей выходной мощности массива  $P(k)$ . Это значение сравнивается со значением, полученным из предыдущего измерения  $P(k-1)$ . Если выходная мощность увеличилась с момента последнего измерения, возмущение выходного напряжения будет продолжаться в том же направлении, что и в последнем цикле. Если выходная мощность уменьшилась

с момента последнего измерения, возмущение выходного напряжения будет противоположным направлению последнего цикла. Рабочее напряжение  $V$  возмущается с каждым циклом ТММ, и как только достигается ТММ,  $V$  будет колебаться вокруг идеального рабочего напряжения  $V_{ТММ}$ . Эти колебания приведут к потере мощности, величина которой зависит от шага единичного возмущения. Если ширина шага велика, алгоритм ТММ будет быстро реагировать на внезапные изменения условий работы, что проявляется в виде увеличения потерь при стабильных или медленно меняющихся условиях. Если ширина шага очень мала, потери в стабильных или медленно меняющихся условиях будут меньше, но система будет медленно реагировать на быстрые изменения температуры или освещенности (Issa H.A., Mohammed H.J., Abdali L.M., Al Bairmani A.G., Ghachim M. [Mathematical Modeling and Controller for PV System by Using MPPT Algorithm]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 96-101. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-96-101).

Минус этого метода – низкая скорость отслеживания и высокие колебания вокруг ТММ.

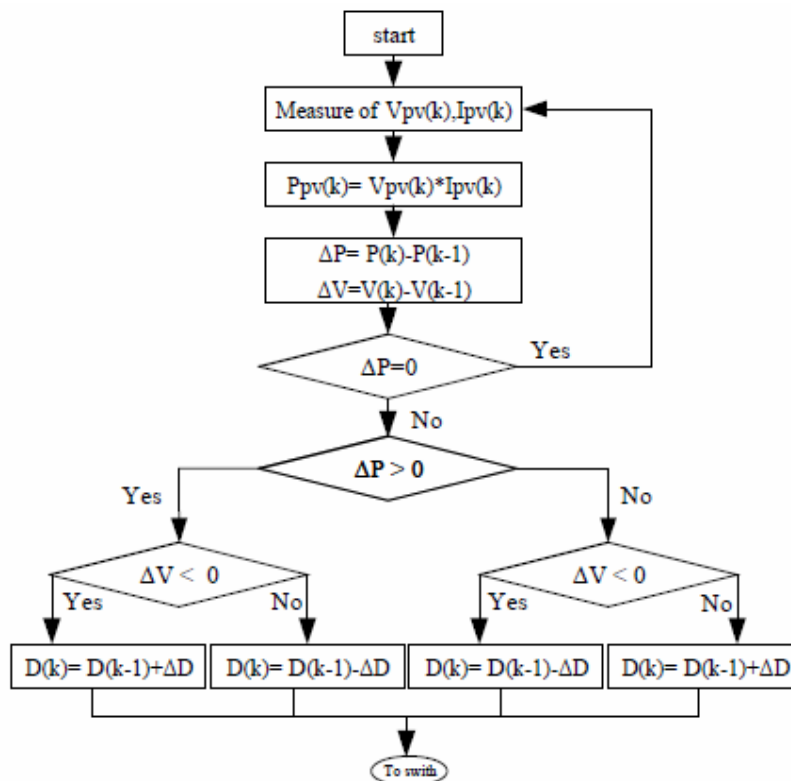


Рис. 4. Блок-схема алгоритма P&O

Fig. 4. The flow chart of the algorithm P&O

### Контроллер нечеткой логики

В последнее время метод нечеткой логики был введен в процесс отслеживания ТММ в фотоэлектрической системе. Нечеткая логика проста в использовании благодаря своей эвристической природе, связанной с простотой и эффективностью для линейных и нелинейных систем. Преимущества: не требует точной математической модели, может работать с неточными входами, нелинейностью, более надежен, чем методы управления обычными нелинейными контроллерами.

Работа нечеткого логического управления может быть классифицирована тремя основными элементами, а именно: фаззификацией, механизмом вывода с правилами и дефаззификацией. Фаззификация – это процесс преобразования фактического значения системы в лингвистические нечеткие множества с использованием нечеткой функции принадлежности. Функция принадлежности – это кривая, которая описывает каждую точку значения принадлежности во входном пространстве. Нечеткая база

правил – это набор правил «ЕСЛИ – ТО», которые содержат всю информацию для управляемых параметров. Она устанавливается в соответствии с профессиональным опытом и работой системы управления. Механизм нечетких выводов – это операционный метод, который формулирует логическое решение на основе нечеткого задания правил и преобразует нечеткую базу правил в нечеткий лингвистический вывод. Дефаззификатор – это способ преобразования нечетких лингвистических множеств обратно в фактическое значение [27]. НЛУ имеет два входа – «ошибка» и «изменение ошибки», а также выход, подающий модуляцию ширины импульса для управления преобразователем постоянного тока. Входные сигналы зависят от мгновенных значений мощности и выходного напряжения, которые, в свою очередь, зависят от параметров окружающей атмосферы, таких как излучение и температура [28]. Две входные переменные НЛУ – «ошибка»  $E(k)$  и «изменение ошибки»  $\Delta E(k)$  – в моменты времени  $k$  показаны на рисунке 5.

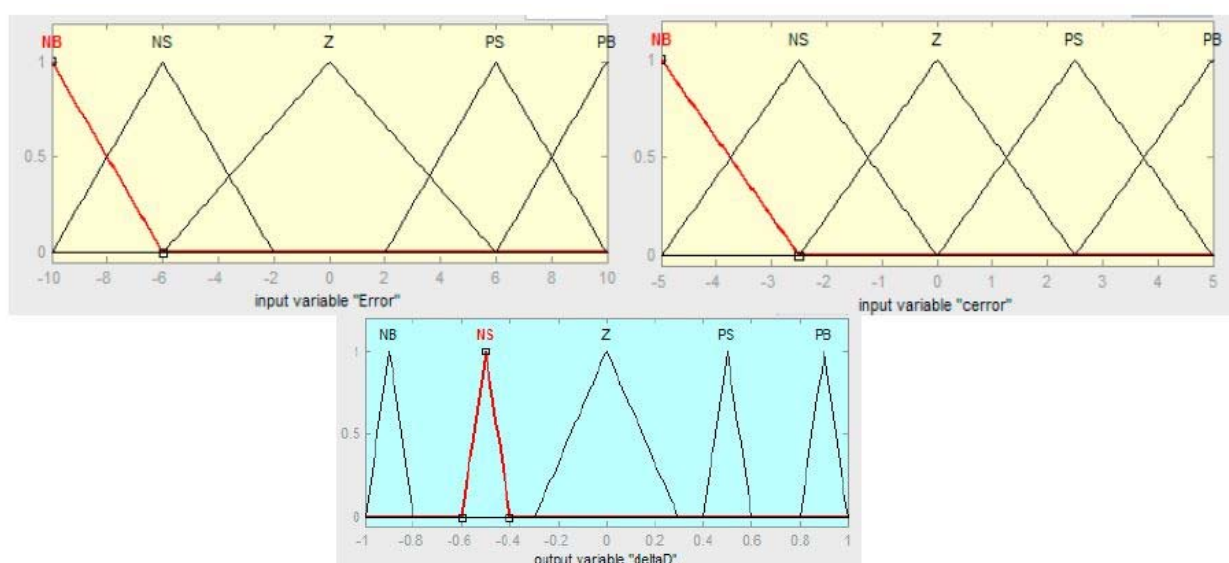


Рис. 5. Нечеткие функции принадлежности

Fig. 5. Fuzzy membership functions

### Результаты исследования и их обсуждение

Чтобы проверить трекер ТММ для фотоэлектрической системы моделирования, предлагаемый метод необходимо сравнить с Р&О ТММ при различных параметрах окружающей среды, чтобы показать, как предлагаемый метод ТММ может эффективно и точно отслеживать максимальную мощность при различных условиях.

Моделирование функциональной схемы было проведено с использованием параметров, указанных в таблице, с помощью платформы MATLAB SIMULINK. Модель, использованная для моделирования, показана на рисунке 6.

Выход блока управления ТММ представляет собой стабилизирующий сигнал, используемый для управления IGBT. Понижающий преобразователь рассчитан на максимальную мощность

350 Вт, максимальное напряжение в точке питания 43 В, выходное напряжение в диапазоне 20...51 В. Трекер ТММ должен отслеживать максимальную мощность при изменении атмосферных условий. Проведенные экспериментальные исследования показали повышение эффективности предложенного метода ТММ в отслеживании точки максимальной мощности фотоэлектрической системы. В этом эксперименте солнечная радиация быстро изменялась в виде единичного шага при поддержании постоянной температуры при 25 °С от 400 до 1000, а затем 600 Вт/м<sup>2</sup>. Увеличение солнечного излучения начинается с 400 Вт/м<sup>2</sup> и за время 0,2 с оно достигает 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Затем за время 0,4 с солнечная радиация резко снижалась до 600 Вт/м<sup>2</sup>. В этой ситуации метод НЛЮ ТММ мог успешно отслеживать точку максимальной мощности. Эффективность отслеживания методом НЛЮ ТММ при этом составила 97,77 %.

#### Комбинация правил вывода

#### Combination of inference rules

$\Delta D$		E				
		NB	NS	Z	PS	PB
CE	NB	NB	NB	NB	NS	NS
	NS	NB	NB	NS	NS	NS
	Z	NB	NS	NB	PS	PB
	PS	PS	PS	PS	PB	PB
	PB	PB	PB	PB	PS	PS

Отслеживаемая максимальная мощность и соответствующие напряжение и ток  $PV$  при максимальной мощности показаны на рисунке 7. Сравнивая результаты с использованием метода НЛЮ с результатами, полученными с использованием метода Р&О, имеем, что Р&О отслеживает точно максимальную мощность, но колебания около точки максимальной мощности

больше, чем при использовании метода НЛЮ (данные приведены на рис. 8). При этом эффективность отслеживания ТММ с использованием метода Р&О составляет 94 %, что меньше, чем при использовании метода НЛЮ.

Предложенный метод также тестируется при изменении температуры при сохранении фиксированной солнечной радиации на уровне 1000 Вт/м<sup>2</sup>. В этом случае температура с 25 °С повышается до 55 °С за 0,06 с. Метод НЛЮ МРРТ успешно отслеживал максимальную мощность с эффективностью 97,82 %, в то время как эффективность отслеживания с использованием метода Р&О МРРТ составляла 95,95 %. Максимальная мощность, отслеживаемая предлагаемым методом, и соответствующие напряжение и ток  $PV$  показаны на рисунке 9, а максимальная мощность, отслеживаемая методом Р&О, – на рисунке 10.

#### Выводы

Результаты моделирования показывают, что предложенный нечеткий алгоритм может быстрее отслеживать ТММ по сравнению с Р&О. Предлагаемый МРРТ-метод с использованием нечеткой логики может повысить производительность системы. Нечеткие правила формируются на основе ошибки и изменения ошибки, взятых из наклона кривых  $PV$  солнечного элемента. Можно сделать вывод, что использование ТММ в фотоэлектрической системе может хорошо работать при различной освещенности и температуре. Колебания вокруг ТММ уменьшаются, а отклик становится быстрее по сравнению с обычными методами. Сравнение эффективности отслеживания обоих методов показывает, что предлагаемый метод имеет более высокую эффективность, чем традиционный метод Р&О ТММ.

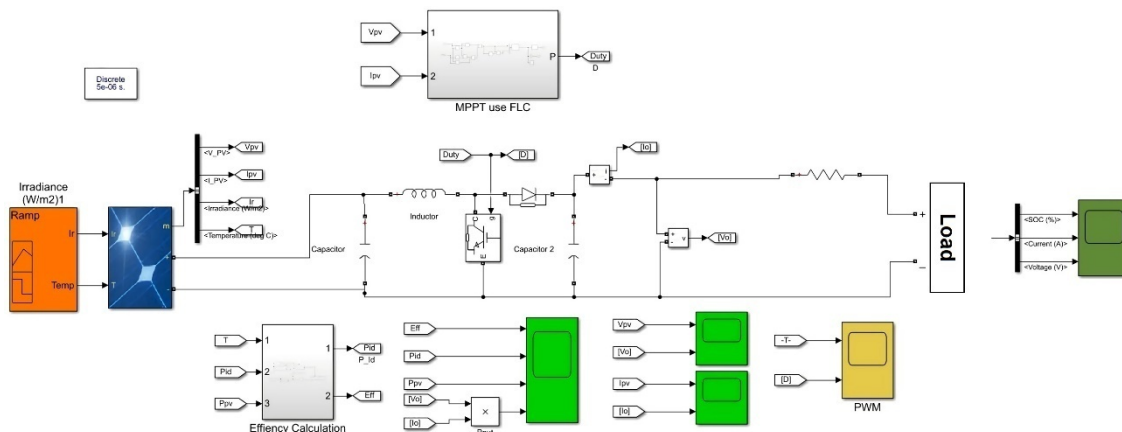


Рис. 6. Модель фотоэлектрической системы в MATLAB Simulink

Fig. 6. Model of the PV System in MATLAB Simulink

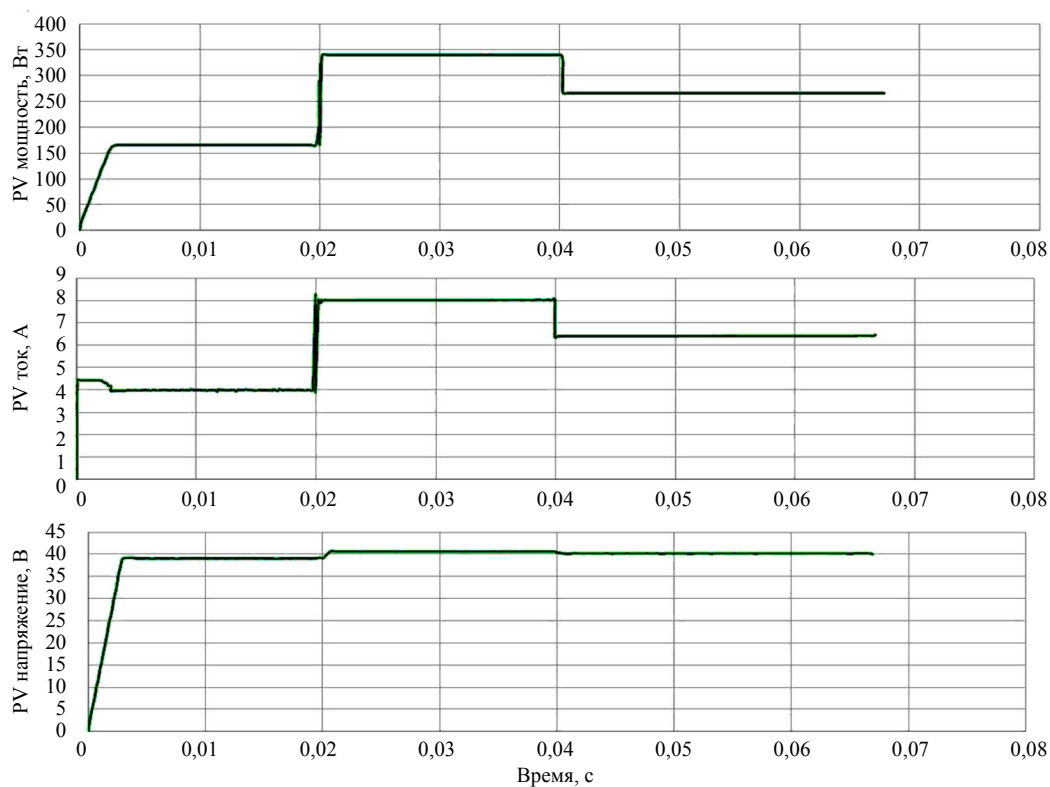


Рис. 7. Мощность, ток и напряжение от фотоэлектрического модуля с использованием нечеткого метода для ТММ

Fig. 7. The Power, current and the voltage from the PVmodule by using the fuzzy method for MPPT

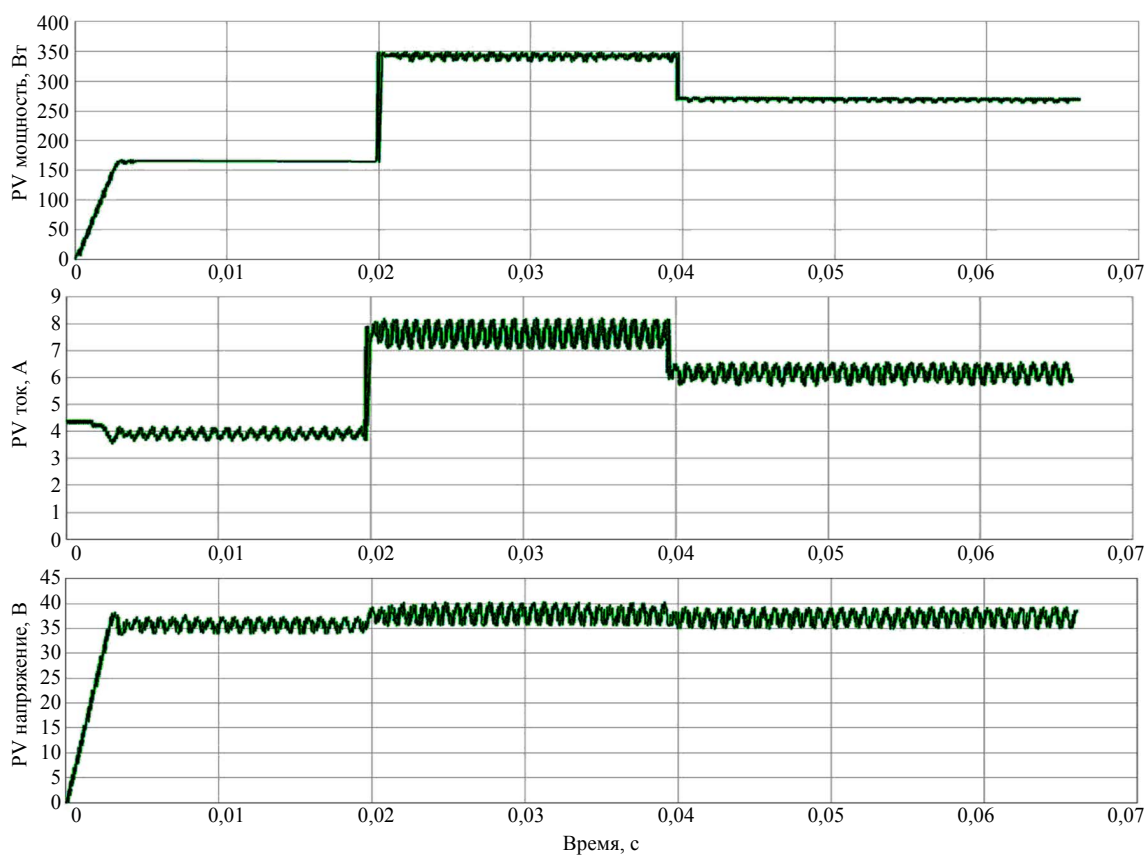


Рис. 8. Мощность, ток и напряжение от фотоэлектрического модуля с использованием метода P&O для ТММ

Fig. 8. The Power, current and the voltage from the PVmodule by using the P&O method for MPPT



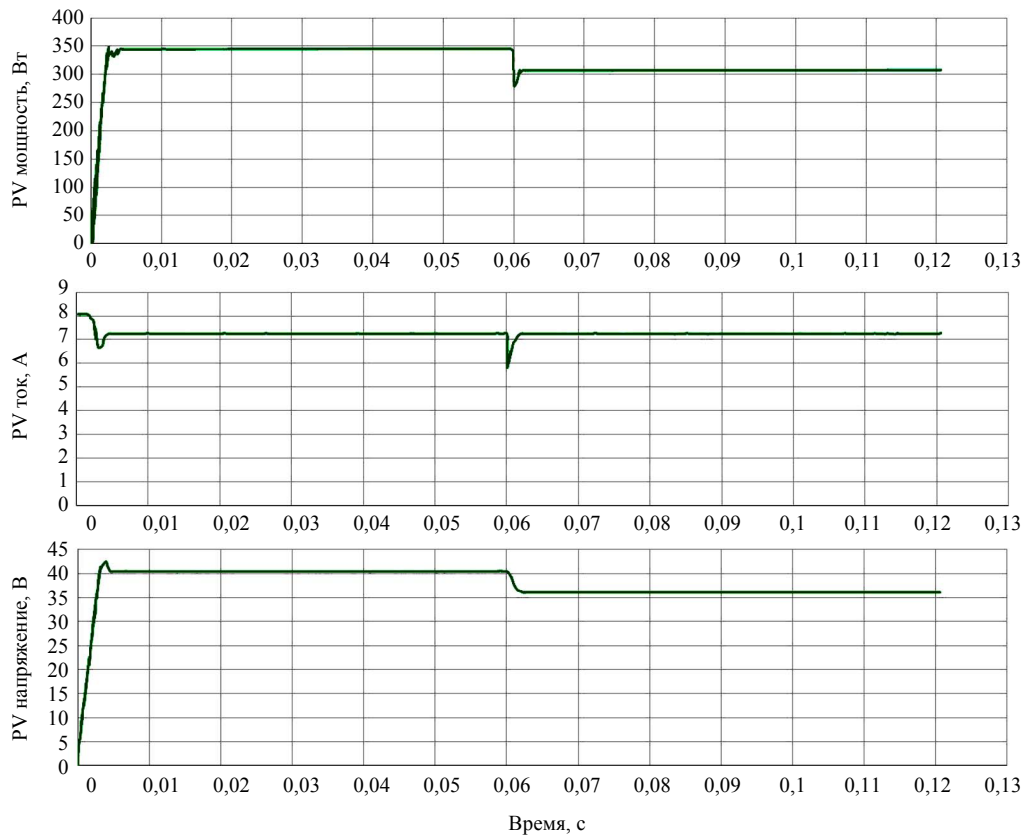


Рис. 9. Мощность, ток и напряжение от фотоэлектрического модуля с использованием нечеткого метода для ТММ

Fig. 9. The power, current and the voltage from the PV module by using the fuzzy method for MPPT

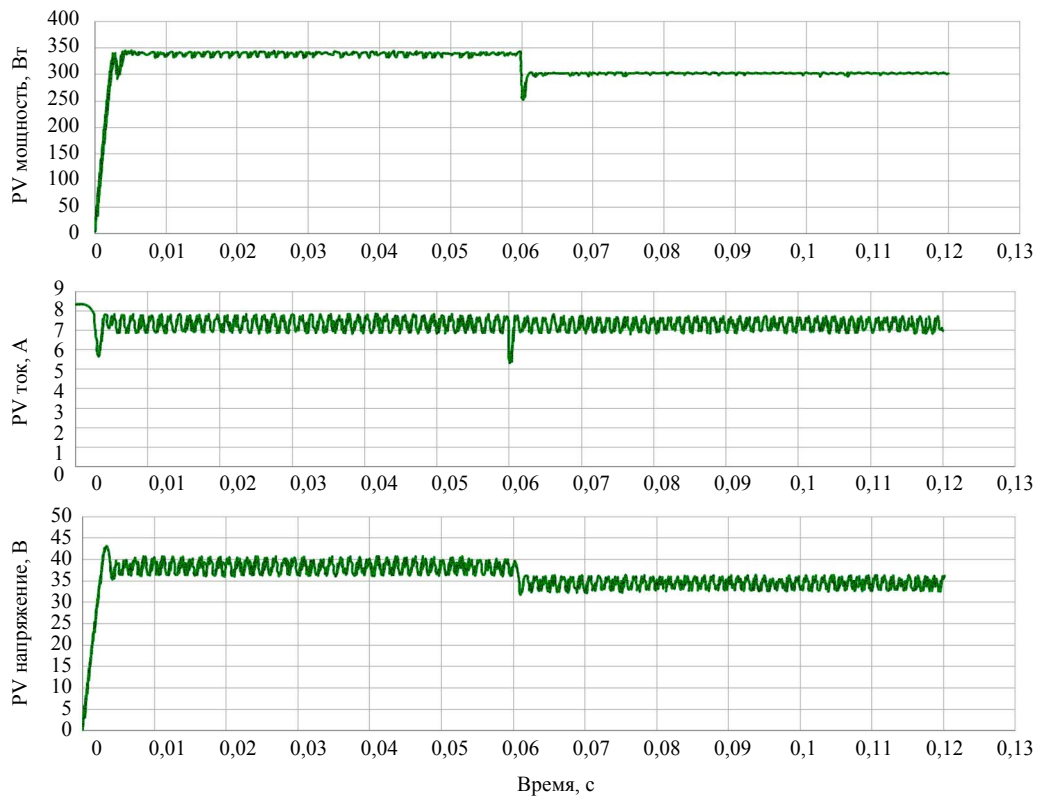


Рис. 10. Мощность, ток и напряжение от фотоэлектрического модуля с использованием P&O метода для ТММ

Fig. 10. The power, current and the voltage from the PV module by using the P&O method for MPPT

## Библиографические ссылки

1. *Javed K., Ashfaq H., Singh R.* (2020) A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy*, 2020, 17, 48-61. DOI: 080/15435075.2019.1686001
2. *Pathak P.K., Padmanaban S., Yadav A.K., Alvi P.A., & Khan B.* (2022) Modified incremental conductance MPPT algorithm for SPV based grid tied and standalone systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16(4), pp.776-791.
3. *Mehrjerdi H.* (2020) Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 2020, 156, 183-192. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.090
4. *Shaw R.N., Walde P., & Ghosh A.* (2020) 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.* (2020) 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.* (2021) Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021, 7, pp. 1657-1671.
7. *Rajesh T., Gunapriya B., Sabarimuthu M., Karthikkumar S., Raja R., Karthik M.* (2021) Frequency control of PV-connected micro grid system using fuzzy logic controller. *Materials Today: Proceedings* 45, 2021, pp. 2260-2264. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.255
8. *Rezk Hegazy, Mokhtar Aly, Mujahed Al-Dhaifallah, Masahito Shoyama* (2019) Design and hardware implementation of new adaptive fuzzy logic-based MPPT control method for photovoltaic applications. *Ieee Access*, 2019, 7, 106427-106438.
9. 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.
10. *Belkaid A., Colak I., Kayisli K.* (2017) Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.*, 2017, 99, 839-846.
11. *Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y.* (2020) 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.* (2019) 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), 869-884.
13. *Aouchiche N., Aitcheikh M.S., Becherif M., Ebrahim M.A.* (2018) 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.* (2019) Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies*, 2019, 12, 1451. Senol M., Abbasoğlu 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. *Rajavel A., Rathina Prabha N.* (2021) Fuzzy logic controller-based boost and buck-boost converter for maximum power point tracking in solar system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2021, 43(4), 945-957.
16. *Li Xingshuo, Huiqing Wen, Yihua Hu, Lin Jiang* (2019) A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application. *Renewableenergy* 2019, 130, 416-427. DOI: 10.1016/j.renene.2018.06.071
17. *Khatib Tamer, Wilfried Elmenreich* (2016) Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes. John Wiley & Sons, 2016.
18. *Ram J., Prasanth T. Sudhakar Babu, Rajasekar N.* (2017) A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, 826-847.
19. *Gheisarnejad Meysam, Hamed Farsizadeh, Mohammad Hassan Khooban* (2020) A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC-DC power buck converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 68, 6849-6858.
20. *Miqoi S., El Ougli A., Tidhaf B.* (2019) Adaptive fuzzy sliding mode based MPPT controller for a photovoltaic water pumping system. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 414-422. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i1.pp414-422
21. *Hannan Mahammad A., Zamre ABD Ghani, Md Murshadul Hoque, Pin Jern Ker, Aini Hussain, Azah Mohamed* (2019) Fuzzy logic inverter controller in photovoltaic applications: Issues and recommendations. *Ieee Access*, 2019, 7, 24934-24955. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2899610
22. *Mitrofanov S.V., Baykasenov D.K., Suleev M.A.* (2018) Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In *2018 International Ural Conference on Green Energy*, 90-96. IEEE, 2018.
23. *Pilakkat Deepthi, Kanthalakshmi S.* (2019) An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions. *Solar Energy*, 2019, 178, 37-47.
24. *Jabber Noor H., Amel A. Ridha, Maher AR Sadiq Al-Baghdadi* (2022) Design and Simulation of Intelligent Maximum Power Point Tracking (MPPT) based on Fuzzy Logic Controller for PV System. In *2022 International Conference on Computer Science and Software Engineering (CSASE)*, 157-162. IEEE, 2022.
25. *Tounsi Mahmoud Mostefa, Bouziane Meliani, Noredine Benaired, Fatiha Djaafar* (2023) Fuzzy logic controller of photovoltaic panel-unified power quality conditioner with voltage compensation and stability.

International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), 2023, 14, 1, 577-588.

26. Tounsi M.M., Meliani B., Benaired N., Djaafar F. (2023) Fuzzy logic controller of photovoltaic panel-unified power quality conditioner with voltage compensation and stability. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2023, 14, 1, 577-588. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijped.v14.i1>

27. Bollipo Ratnakar Babu, Suresh Mikkili, Praveen Kumar Bonthagorla (2020) Critical review on PV MPPT techniques: classical, intelligent and optimisation. IET Renewable Power Generation, 2020, 14, 9, 1433-1452.

28. Seguel Julio López, Seleme I. Seleme Jr. (2021) Robust digital control strategy based on fuzzy logic for a solar charger of VRLA batteries. Energies, 2021, 14, 4, 1001. DOI: 10.3390/en14041001

### References

1. Javed K., Ashfaq H., Singh R. (2020) A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. Int. J. Green Energy, 2020, 17, 48-61. DOI: 080/15435075.2019.1686001

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

3. Mehrjerdi H. (2020) Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. Renewable Energy, 2020, 156, 183-192. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.090

4. Shaw R.N., Walde P., & Ghosh A. (2020) 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. (2020) 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. (2021) Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. Energy Reports, 2021, 7, pp. 1657-1671.

7. Rajesh T., Gunapriya B., Sabarimuthu M., Karthikkumar S., Raja R., Karthik M. (2021) Frequency control of PV-connected micro grid system using fuzzy logic controller. Materials Today: Proceedings 45, 2021, pp. 2260-2264. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.255

8. Rezk Hegazy, Mokhtar Aly, Mujahed Al-Dhaifallah, Masahito Shoyama (2019) Design and hardware implementation of new adaptive fuzzy logic-based MPPT control method for photovoltaic applications. Ieee Access, 2019, 7, 106427-106438.

9. Abdali L.M., Issa H.A., Al-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. (2022) [Study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting]. *Stroitel'stvo i tehnogennaja bezopasnost'*, 2022, no. 25(77), pp. 75-85 (in Russ.).

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

11. Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y. (2020) 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. (2019) 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), 869-884.

13. Aouchiche N., Aitcheikh M.S., Becherif M., Ebrahim M.A. (2018) 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. (2019) Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. Energies, 2019, 12, 1451. Senol M., Abbasoğlu 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. Rajavel A., Rathina Prabha N. (2021) Fuzzy logic controller-based boost and buck-boost converter for maximum power point tracking in solar system. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(4), 945-957.

16. Li Xingshuo, Huiqing Wen, Yihua Hu, Lin Jiang (2019) A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application. Renewableenergy 2019, 130, 416-427. DOI: 10.1016/j.renene.2018.06.071

17. Khatib Tamer, Wilfried Elmenreich (2016) Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes. John Wiley & Sons, 2016.

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

19. Gheisarnejad Meysam, Hamed Farsizadeh, Mohammad Hassan Khooban (2020) A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC-DC power buck converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68, 6849-6858.

20. Miqui S., El Ougli A., Tidhaf B. (2019) Adaptive fuzzy sliding mode based MPPT controller for a photovoltaic water pumping system. International Journal of Power Electronics and Drive System, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 414-422. DOI: 10.11591/ijped.v10.i1.pp414-422

21. Hannan Mahammad A., Zamre ABD Ghani, Md Murshadul Hoque, Pin Jern Ker, Aini Hussain, Azah Mohamed (2019) Fuzzy logic inverter controller in photovoltaic applications: Issues and recommendations. Ieee Access, 2019, 7, 24934-24955. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2899610

22. Mitrofanov S.V., Baykasenov D.K., Suleev M.A. (2018) Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In 2018 International Ural Conference on Green Energy, 90-96. IEEE, 2018.
23. Pilakkat Deepthi, Kanthalakshmi S. (2019) An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions. *Solar Energy*, 2019, 178, 37-47.
24. Jabber Noor H., Amel A. Ridha, Maher AR Sadiq Al-Baghdadi (2022) Design and Simulation of Intelligent Maximum Power Point Tracking (MPPT) based on Fuzzy Logic Controller for PV System. In 2022 International Conference on Computer Science and Software Engineering (CSASE), 157-162. IEEE, 2022.
25. Tounsi Mahmoud Mostefa, Bouziane Meliani, Noreddine Benaired, Fatiha Djaafar (2023) Fuzzy logic controller of photovoltaic panel-unified power quality conditioner with voltage compensation and stability. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2023, 14, 1, 577-588.
26. Tounsi M.M., Meliani B., Benaired N., Djaafar F. (2023) Fuzzy logic controller of photovoltaic panel-unified power quality conditioner with voltage compensation and stability. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2023, 14, 1, 577-588. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i1>
27. Bollipo Ratnakar Babu, Suresh Mikkili, Praveen Kumar Bonthagorla (2020) Critical review on PV MPPT techniques: classical, intelligent and optimisation. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14, 9, 1433-1452.
28. Seguel Julio López, Seleme I. Seleme Jr. (2021) Robust digital control strategy based on fuzzy logic for a solar charger of VRLA batteries. *Energies*, 2021, 14, 4, 1001. DOI: 10.3390/en14041001

### Comparison of Control Method System by Using Perturbation and Observation Algorithms and Fuzzy Logic for the Maximum Power Point Control in Photovoltaic Systems

Q.A. Ali, Postgraduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

L.M. Abdali, Postgraduate, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

N.V. Korovkin, DSc in Engineering, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

B.A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V.V. Kuvshinov, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*Currently, photovoltaic energy conversion has developed tremendously in the global energy industry. The enormous capacity of solar power plants generates electricity all over the world. Hundreds of gigawatts of electrical energy are supplied to the networks of various countries around the globe. In addition, up to hundreds of gigawatts of installed capacity of solar power plants are commissioned every year in all countries of the world. And this has been the trend for the past few decades. The main problem of solar photovoltaic conversion is the instability of the solar radiation flux associated with the climatic conditions in the regions where photovoltaic plants are operated. This problem can be solved by using highly efficient methods to control the generation of solar power plants, in particular, such as the use of information control systems for a particular PV system to increase the final generation of electrical energy supplied to the consumer.*

*The photovoltaic (PV) conversion of solar radiation flux is an important renewable energy source. Due to the varying intensity of the sun, the electricity generated by PV directly from the radiation flux is not constant. The photovoltaic system currently uses maximum power point (PMP) tracking in perturbation and observation (P&O) mode to increase the final output power of the photovoltaic panels. A step-down DC-DC converter allows PMP to change the PV operating voltage and determine the maximum power output of the PV panel.*

*This study proposes a fuzzy logic implementation. The magnitude of the perturbed voltage is determined by the change in power  $dq$  and the change in power relative to the change in voltage  $dq/dv$  is fuzzy. The performance of fuzzy logic is investigated in this work in order to optimize MPM. Fuzzy logic can simplify maximum power tracking and reduce voltage instability. According to the simulation results, the MPM method based on fuzzy computation performs better than the traditional P&O method. By using the proposed methods, we can significantly improve electric power generation and increase the efficiency of photovoltaic conversion.*

**Keywords:** fuzzy control, buck converter, maximum power point, solar battery charger, photovoltaic systems.

Получено 02.02.2023

#### Образец цитирования

Сравнение методов управления при использовании алгоритмов возмущения и наблюдения и нечеткой логики для контроля точки максимальной мощности в фотоэлектрических системах / К. А. Али, Л. М. Абдали, Н. В. Коровкин, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 2. С. 4–15. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-4-15.

#### For Citation

Q.A. Ali, L.M. Abdali, N.V. Korovkin, B.A. Yakimovich, V.V. Kuvshinov [Comparison of Control Method System by Using Perturbation and Observation Algorithms and Fuzzy Logic for the Maximum Power Point Control in Photovoltaic Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 4-15 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-4-15.