



МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С КОНТРОЛЛЕРОМ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

С.Г. Обухов, И.А. Плотников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050 Томск, пр. Ленина, д. 30
Тел.: (3822) 563-501, e-mail: serob99@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 10.07.15 Заключение совета экспертов: 13.07.15 Принято к публикации: 16.07.15

В статье представлены результаты моделирования и исследования режимов работы солнечной фотоэлектрической станции с контроллером поиска точки максимальной мощности. Рассмотрены наиболее распространенные методы поиска точки максимальной мощности солнечных батарей: метод постоянного напряжения; метод напряжения холостого хода; метод короткого замыкания; метод случайных возмущений; метод приращения проводимости. Построена комплексная модель фотоэлектрической станции, включающей в себя солнечную батарею, силовой преобразователь с контроллером управления. Приведены результаты моделирования рабочих режимов системы при изменении солнечной инсоляции и температуры солнечной батареи.

Выполненный обзор различных методов поиска точки максимальной мощности солнечной батареи и анализ их функционирования при различных климатических условиях может быть полезен широкому кругу специалистов в области фотоэнергетики. Все предложенные модели компонентов фотоэлектрических систем реализованы в MATLAB/Simulink, что позволяет использовать их после несложной доработки для исследования систем произвольной конфигурации с другими типами преобразователей и контроллеров поиска точки максимума отбора мощности.

Ключевые слова: солнечный элемент, солнечная панель, фотоэлектрическая электростанция, контроллер поиска точки максимума отбора мощности, MATLAB.

MODELING AND STUDY OF MODES OF SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER PLANT WITH A MAXIMUM POWER POINT TRACING CONTROLLER

S.G. Obukhov, I.A. Plotnikov

National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel.: (3822) 563-501, e-mail: serob99@mail.ru

Referred: 10.07.15 Expertise: 13.07.15 Accepted: 16.07.15

The results of modeling and investigation of solar photovoltaic power plant modes with maximum power tracking controller are represented. The most widespread methods for maximum power point tracking of solar panels are considered. The DC voltage method, no-load method, short circuit method, method of random disturbances and conductance increment method are reviewed. Complex photovoltaic plant model, including solar panel, power converter with controller, is created. The results of system's operating modes simulation when changing the insolation and the temperature of the solar cell are represented.

The review of the various methods to search for the maximum power of the solar cell conducted and the analysis of their performance under different climatic conditions can be useful for a wide circle of professionals in the field of photovoltaics. All the proposed models of photovoltaic systems components are implemented in MATLAB/Simulink, which allow their use after a simple revision for the investigation of any systems with other types of converters and maximum power tracking controllers.

Keywords: solar cell, solar panel, photovoltaic power plant, maximum power tracking controller, MATLAB.



Сергей Геннадьевич
Обухов
Sergey G. Obukhov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Образование: Томский политехнический институт (1985).

Область научных интересов: энергетика, возобновляемая энергетика.

Публикации: 83.

Information about the author: Doctor of Science (Technology), associate professor of the Department of electrical industries, National Research Tomsk Polytechnic University.

Education: Tomsk Polytechnic Institute (1985).

Research area: energy, renewable energy.

Publications: 83.



Игорь Александрович
Плотников
Igor A. Plotnikov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Образование: Томский политехнический институт (1984).

Область научных интересов: энергетика, возобновляемая энергетика, силовая электроника.

Публикации: 72.

Information about the author: PhD (Technology), associate professor of the Department of electrical industries, National Research Tomsk Polytechnic University.

Education: Tomsk Polytechnic Institute (1984).

Research area: energy, renewable energy, power electronics.

Publications: 72.

Введение

Фотоэлектрическое преобразование солнечного излучения является одной из самых перспективных технологий производства электрической энергии. В сравнении с другими технологиями возобновляемой энергетики ее конкурентными преимуществами являются доступность, большой срок службы, возможность создания генерирующих установок на широкий диапазон мощностей с максимальным приближением к объектам электропотребления. Рынок солнечной энергетики активно развивается, а фотоэлектрические станции (ФЭС) находят практическое применение в качестве источников питания самых разнообразных объектов в различных областях человеческой жизнедеятельности [1, 2].

В составе большинства современных ФЭС используется контроллер поиска точки максимальной мощности (ПТММ) (MPPT controller). Необходимость его применения вызвана тем, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) солнечных батарей (СБ) являются нелинейными и изменяются в зависимости от значений солнечной инсоляции и температуры. В общем случае для каждой из возможных комбинаций величины температуры и интенсивности солнечного излучения на ВАХ имеется единственная точка максимальной мощности (ТММ), на которой

все компоненты электростанции могут работать с максимальной эффективностью, вырабатывая максимально возможную мощность. Работа в ТММ, обеспечиваемая контроллером ПТММ, позволяет увеличить выработку электроэнергии ФЭС на 15-25%.

Контроллер ПТММ представляет собой силовой преобразователь с экстремальной системой автоматического управления [3], которая, как правило, реализуется с использованием микропроцессорной техники. К настоящему времени разработано множество методов поиска ТММ СБ, часть из которых практически реализована и доступна для потребителя в коммерчески выпускаемых контроллерах ПТММ [4]. При этом известные методы поиска ТММ, а соответственно, и контроллеры, отличаются друг от друга по целому ряду показателей: количеству измерительных датчиков, сложности аппаратной реализации, скорости сходимости, диапазонам эффективной работы, стоимости и т.д. [4-6]. К сожалению, большинство представленных на рынке контроллеров ПТММ импортного производства. В современных условиях развития экономики, ориентированной на импортозамещение, актуальной является задача разработки отечественных контроллеров ПТММ для ФЭС.

Цель исследований, представленных в настоящей статье, состояла в моделировании и изучении режимов работы солнечной ФЭС с контроллером ПТММ.



Обзор известных методов поиска ТММ солнечных батарей

Известные методы поиска ТММ солнечных батарей можно разделить на две группы: косвенные и поисковые [5].

Наибольшее применение из косвенных методов поиска ТММ получили методы постоянного напряжения [7, 8], напряжения холостого хода [9, 10], тока короткого замыкания [7, 9], температурный метод [11, 12], метод вычисления максимума мощности [13, 14]. В косвенных методах выходная мощность СБ непосредственно не измеряется и, соответственно, ТММ может быть определена только с некоторым приближением. Однако косвенные методы надежны, просты в реализации и обеспечивают высокое быстродействие [15, 16].

К поисковым алгоритмам относится классический метод случайных возмущений [17, 18] и его многочисленные модификации [12, 19], метод приращения проводимости [20, 21], методы искусственного интеллекта, построенные на нечеткой логике [22, 23] и с применением нейронных сетей [23, 24], и др. [25, 26]. Поисковые методы позволяют более точно отслеживать ТММ, но их практическая реализация сложнее. Кроме того, поисковые методы могут приводить к ошибке нахождения направления поиска ТММ в условиях резкого изменения освещенности, а также определения глобального максимума мощности при частичном затемнении модулей СБ. В некоторых случаях применяют комбинированные методы, в которых используются как косвенные, так и поисковые алгоритмы [15, 16, 27]. Принцип работы наиболее популярных алгоритмов ПТММ описан в [5, 7, 10], результаты сравнения их характеристик представлены в [4, 6, 12, 15, 16, 26]. Рассмотрим наиболее популярные алгоритмы ПТММ, используемые в промышленных контроллерах.

Метод постоянного напряжения (constant voltage – CV) является самым простым из известных методов поиска ТММ солнечных батарей. Для управления преобразователем в данном методе используется сигнал рассогласования между текущим значением напряжения СБ V_{PV} и фиксированным опорным напряжением V_{REF} , величина которого принимается равной напряжению в ТММ V_{MPP} используемых фотоэлектрических модулей (из технической спецификации) или задается в соответствии с предполагаемыми внешними условиями: уровнем инсоляции и температуры. Метод основан на предположении, что вариации освещенности и температуры СБ в процессе эксплуатации незначительны и постоянное опорное напряжение обеспечивает хорошее приближение к реальному напряжению в ТММ. Таким образом, рабочая точка на характеристике СБ практически никогда не совпадает с реальной ТММ и неизбежны потери энергии. Блок-схема алгоритма CV представлена на рис. 1.

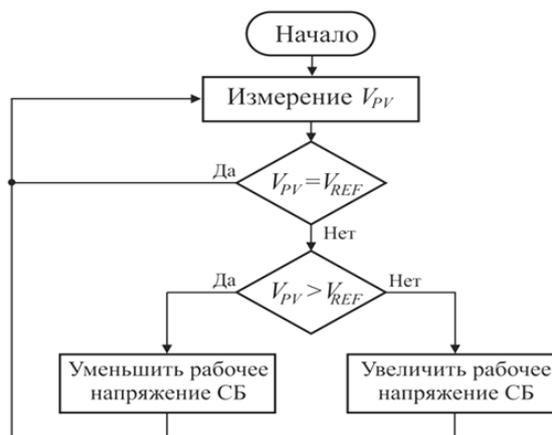


Рис. 1. Блок-схема алгоритма метода постоянного напряжения (CV)
Fig. 1. Algorithm of constant voltage (CV)

Анализ ВАХ фотоэлектрических модулей показывает, что влияние уровня освещенности на величину V_{MPP} незначительно, в то время как изменения температуры приводят к ее заметному смещению, обуславливая невысокую эффективность метода в условиях значительных колебаний температуры. В то же время важным достоинством метода является его эффективная работа в условиях низкой освещенности (на пологих характеристиках), благодаря чему его часто используют совместно с поисковыми алгоритмами.

Метод напряжения холостого хода (open voltage – OC) основан на линейной зависимости между напряжением в ТММ V_{MPP} и напряжением холостого хода V_{OC} солнечной батареи:

$$K \cong V_{MPP} / V_{OC} \quad (1)$$

Численное значение коэффициента пропорциональности K в (1) зависит от типа используемых в СБ фотоэлектрических модулей ($K = 0,73-0,8$) и может быть определено либо по данным технической спецификации модулей, либо расчетным путем для ожидаемых условий эксплуатации (во многих контроллерах величина коэффициента пропорциональности принимается неизменной и равной $K = 0,76$). Практическая реализация данного метода достаточно проста и может быть выполнена даже на аналоговых элементах. Алгоритм работы контроллера заключается в следующем: СБ периодически отключается от нагрузки для замера напряжения холостого хода, после чего рассчитывается выходное опорное напряжение СБ V_{REF} , соответствующее для текущих значений освещенности и температуры напряжению в точке максимальной мощности V_{MPP} . Затем с помощью управляемого преобразователя обеспечивается такая нагрузка СБ, при которой ее выходное напряжение будет соответствовать опорному, и в этом режиме ФЭС функционирует до следующего

измерения. Интервал между измерениями составляет от десятков секунд до нескольких минут (в некоторых моделях контроллеров имеется возможность его регулирования). Недостатками метода являются зависимость K от интенсивности излучения и температуры СБ, потери энергии в режимах измерения напряжения, нечувствительность к деградации и загрязнению солнечных панелей.

Принцип действия **метода тока короткого замыкания** (short current – SC) аналогичен предыдущему, но в нем используется зависимость между током короткого замыкания I_{SC} и током в ТММ I_{MPP} :

$$K \cong I_{MPP} / I_{SC} . \quad (2)$$

Величина коэффициента K определяется типом солнечной панели и, как правило, находится в интервале от 0,86 до 0,98 (в некоторых контроллерах принимается равной $K = 0,9$).

Для реализации данного метода необходим дополнительный ключ в выходной цепи СБ, который должен периодически замыкать ее накоротко. Это приводит к дополнительному рассеиванию энергии в СБ. К тому же величина K является зависимой от освещенности и температуры СБ, что приводит к дополнительным погрешностям в определении ТММ.

Идея алгоритма **метода случайных возмущений** (perturb and observe – PO) заключается в поиске ТММ за счет дискретного изменения величины рабочего напряжения фотоэлектрической панели (обеспечивается с помощью регулируемого преобразователя напряжения).

Входными сигналами контроллера являются текущие значения напряжения $V(k)$ и тока $I(k)$ солнечной панели, в качестве возмущающего сигнала используется результирующее изменение мощности ΔP за один рабочий цикл преобразователя. Блок-схема алгоритма данного метода представлена на рис. 2. Благодаря простоте реализации данный алгоритм получил наибольшее распространение в контроллерах ПТММ. К недостаткам метода следует отнести постоянные колебания рабочей точки вокруг ТММ. Кроме того, данный метод может приводить к ошибочным результатам в определении ТММ при резком изменении уровня освещенности и частичном затенении солнечной панели.

Принцип действия **метода приращения проводимости** (incremental conductance – IC) основан на равенстве мгновенной проводимости солнечной панели и производной проводимости в точке максимальной мощности.

Математические соотношения, поясняющие работу алгоритма метода приращения проводимости (IC), можно легко получить, продифференцировав мощность P солнечной батареи по напряжению V с учетом того, что производная в точке максимальной мощности обращается в нуль:

$$dP/dV = d(VI)/dV = I + V(dI/dV) = 0 . \quad (3)$$

Уравнение (3) можно представить в виде

$$dI/dV = -I/V . \quad (4)$$

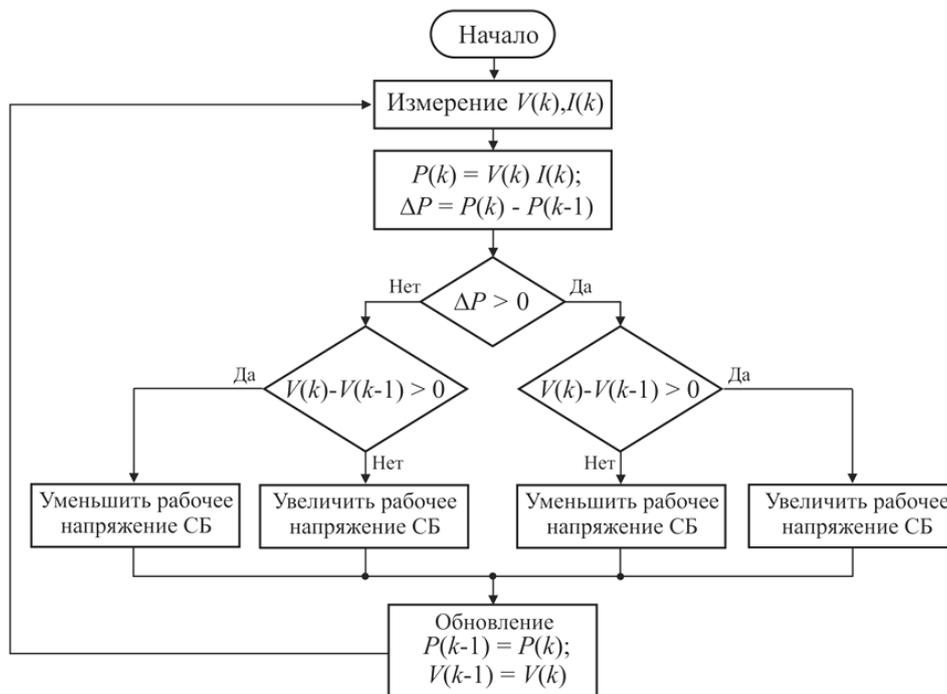


Рис. 2. Блок-схема алгоритма метода случайных возмущений (PO)
 Fig. 2. Algorithm of perturb and observe method (PO)



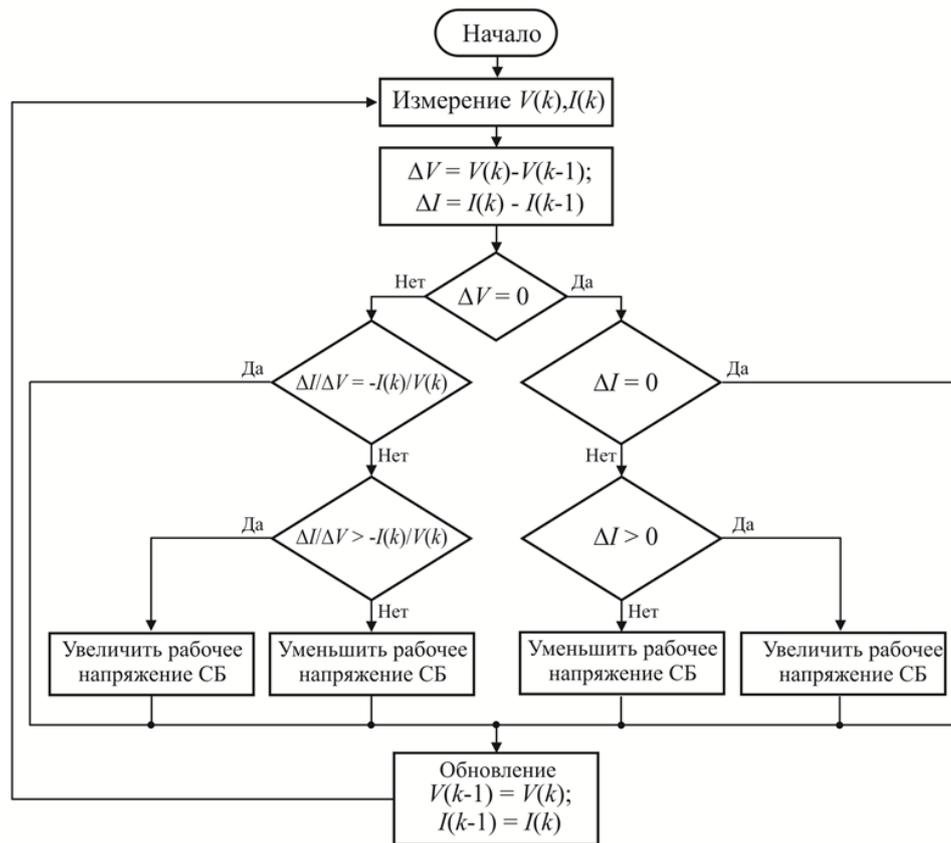


Рис. 3. Блок-схема алгоритма метода приращения проводимости (IC)
 Fig. 3. Algorithm of increments conductivity (IC)

Из (4) вытекают два важных соотношения, которые позволяют определить положение рабочей точки СБ на ее вольт-ваттной характеристике относительно точки максимальной мощности:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right) &- \text{рабочая точка слева от ТММ;} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right) &- \text{рабочая точка справа от ТММ} \end{aligned} \right\} (5)$$

С учетом (5) работа алгоритма IC может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 3.

Данный метод обеспечивает устойчивую работу в ТММ и позволяет точно ее определить даже при резко меняющихся внешних условиях, однако сложность вычислений возрастает.

Построение моделей объекта исследования

Объектом исследования настоящей статьи являются рабочие режимы солнечной ФЭС, функционирующей под управлением контроллера ПТММ. Принятая для анализа схема энергетической системы представлена на рис. 4. СБ через преобразователь постоянного напряжения (ППН) подключена к электрической нагрузке.

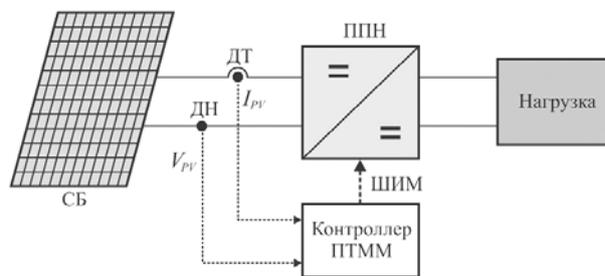


Рис. 4. Структурная схема ФЭС с контроллером ПТММ
 Fig. 4. Block diagram of a photovoltaic plant with a controller maximum power point tracking

Преобразователь работает под управлением контроллера ПТММ, входными сигналами которого являются ток I_{PV} и напряжение V_{PV} СБ, измеряемые датчиком тока (ДТ) и датчиком напряжения (ДН). Выходным сигналом контроллера является широтно-модулированный сигнал управления (ШИМ) силовыми ключами преобразователя.

В качестве инструмента исследования использовался программный пакет MATLAB/Simulink, в котором были разработаны имитационные модели всех основных компонентов системы. Для построения математической модели СБ использовалась эквивалентная схема замещения солнечного элемента с од-

ним диодом, физические процессы в которой описываются известными уравнениями [28, 29, 30]. Описание используемой имитационной модели СБ с примерами ее практического применения подробно рассмотрены в [31].

В качестве исходных данных модели СБ используются текущие значения солнечной радиации (λ) и рабочая температура (T), а также параметры фотоэлектрического модуля, определяемые из его технической спецификации. В данной статье рассматривается СБ, состоящая из двух последовательно соединенных фотоэлектрических модулей Solarex MSX60, основные технические характеристики которых приведены ниже.

Максимальная (пиковая) мощность, P_{MPP} , Вт	60
Напряжение при максимальной мощности, V_{MPP} , В	17,1
Ток при максимальной мощности, I_{MPP} , А	3,5
Напряжение холостого хода, V_{OC} , В	21,1
Ток короткого замыкания, I_{SC} , А	3,8

Температурный коэффициент напряжения холостого хода, K_V , мВ/°С	80±10
коэффициент тока короткого замыкания, K_I , %/°С	0,065±0,015

Результаты расчетных экспериментов показали, что разработанная модель СБ воспроизводит ее ВАХ с удовлетворительной точностью: максимальная погрешность расчетных значений тока короткого замыкания и напряжения холостого хода во всем возможном диапазоне изменения температуры и освещенности не превышает 5,4%. На рис. 5 представлены расчетные вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики фотоэлектрического модуля Solarex MSX60 при разных значениях температуры и освещенности. Результаты расчетных экспериментов подтверждают адекватность отображения моделью физических процессов в фотоэлектрическом модуле при изменении условий эксплуатации.

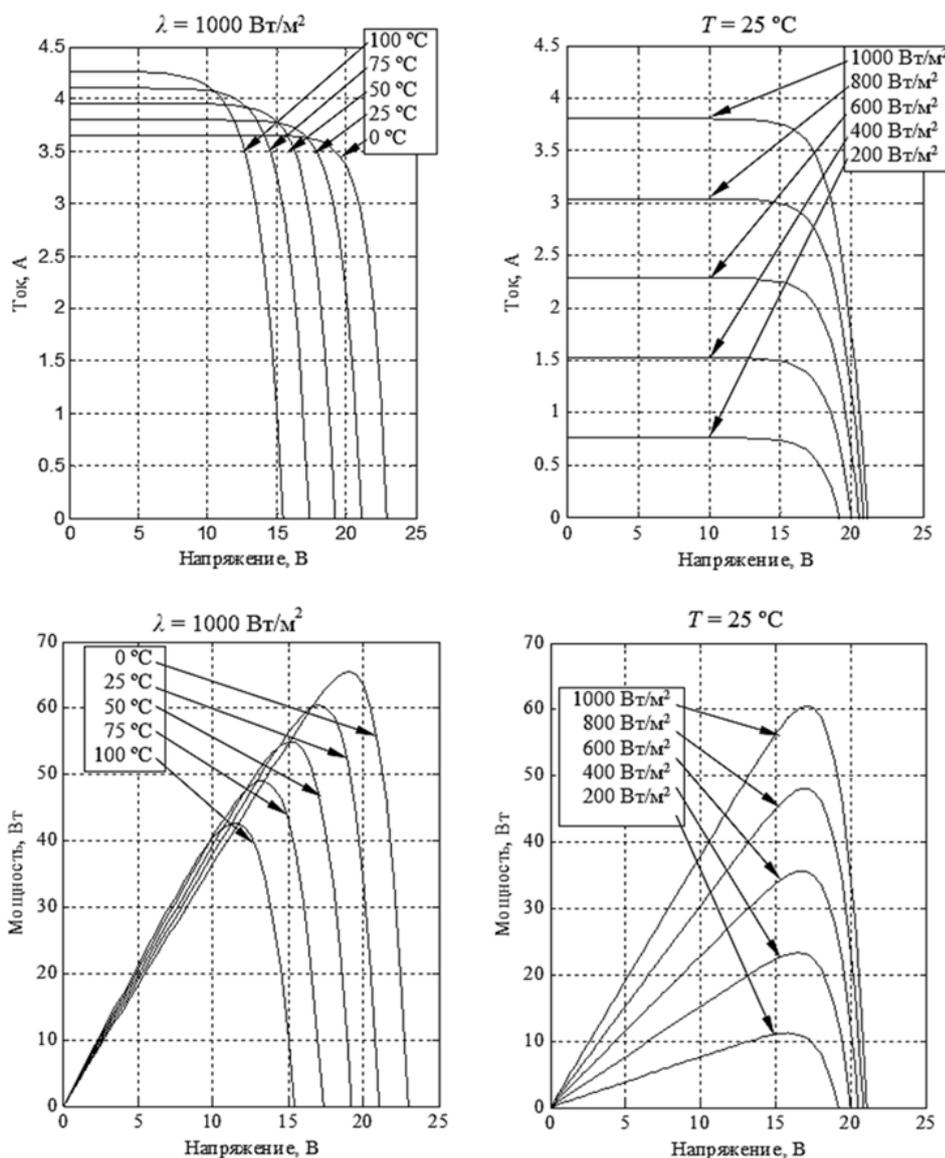


Рис. 5. Расчетные характеристики фотоэлектрического модуля Solarex MSX60
Fig. 5. Pv module Solarex MSX60 characteristics



Для согласования уровней напряжения на выходе СБ с нагрузкой в схемах ФЭС могут быть использованы силовые преобразователи различных типов: непосредственного типа (повышающие, понижающие и т.д.); двухзвенного типа со вставкой переменного тока; с гальванической трансформаторной развязкой и без нее. В данной статье не анализируются вопросы выбора рациональной схемы преобразователя для ФЭС, здесь в качестве примера рассматривается фотоэлектрическая установка с непосредственным преобразователем постоянного напряжения понижающего типа (рис. 6) [32].

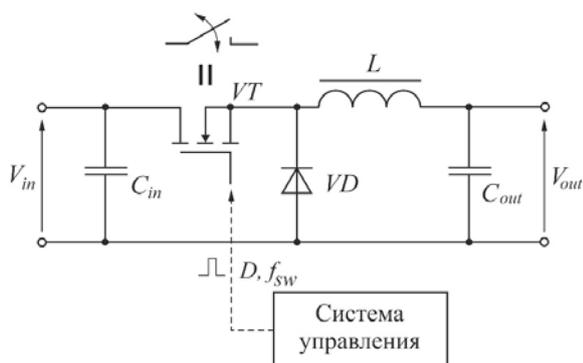


Рис. 6. Принципиальная схема понижающего преобразователя
Fig. 6. Buck converter schematic

Как правило, при проектировании преобразователей частота коммутация ключа VT выбирается постоянной: $f_{sw} = 1/T = \text{const}$, где T – период коммутации ключа. В режиме неразрывных токов дросселя L соотношение между входным V_{in} и выходным V_{out} напряжениями преобразователя определяется выражением

$$V_{out} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} V_{in} = \frac{t_{ON}}{T} V_{in} = DV_{in}, \quad (6)$$

где t_{ON} , t_{OFF} – интервалы времени, в течение которых силовой ключ VT находится в открытом и закрытом состояниях соответственно; D – коэффициент заполнения ($D = 0 \dots 1$).

Для корректного проектирования преобразователя необходимо знать значения его входного и выходного напряжений. В рассматриваемой фотоэлектрической системе преобразователь предназначен для работы на аккумуляторную батарею номинальным напряжением 12 В. Определим величину входного напряжения преобразователя из соображений, что нам необходимо полезно использовать энергию, вырабатываемую СБ, при изменении радиации в пределах от 200 до 1000 Вт/м² и температуры от 0 до 75 °С. Тогда рабочий диапазон контроллера ПТММ для рассматриваемой ФЭС будет представлять собой заштрихованную фигуру, представлен-

ную на рис. 7. Из рисунка можно определить граничные условия работы преобразователя и из условия неразрывности тока дросселя выбрать параметры его элементов [32]

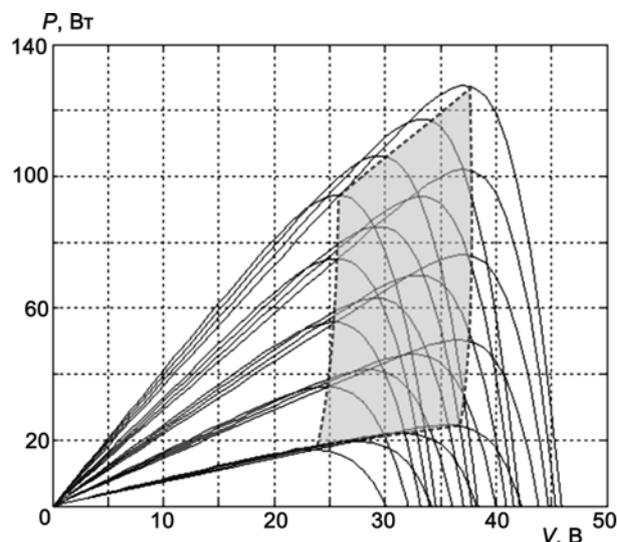


Рис. 7. Рабочий диапазон контроллера ПТММ
Fig. 7. Operating range of the controller maximum power point tracking

Ниже приведены параметры преобразователя постоянного напряжения, которые использовались при проведении вычислительных экспериментов.

Максимальная мощность, Вт	120
Напряжение	
входное V_{in} , В	24-37
выходное V_{out} , В	14
Частота переключения f_{sw} , кГц	15
Индуктивность дросселя L , мкГн	200
Емкость конденсатора	
выходного C_{out} , мкФ	2500
входного C_{in} , мкФ	60

Все модели контроллеров ПТММ, которые рассматривались в настоящей работе, реализованы на базе стандартных элементов Simulink и оформлены в виде отдельных подсистем, что позволяет легко производить их замену. В качестве примера на рис. 8 представлена модель контроллера ПТММ, построенного на основе алгоритма случайных возмущений. Модель состоит из логического блока, реализующего функционирование алгоритма ПТММ (см. рис. 2), элементов коррекции динамики системы (ПИД-регулятор) и блока ШИМ.

Комплексная модель ФЭС с датчиками и контрольно-измерительными приборами представлена на рис. 9. Разработанная модель позволяет воспроизводить динамические режимы работы солнечной электростанции при изменении внешних условий: освещенности и температуры.

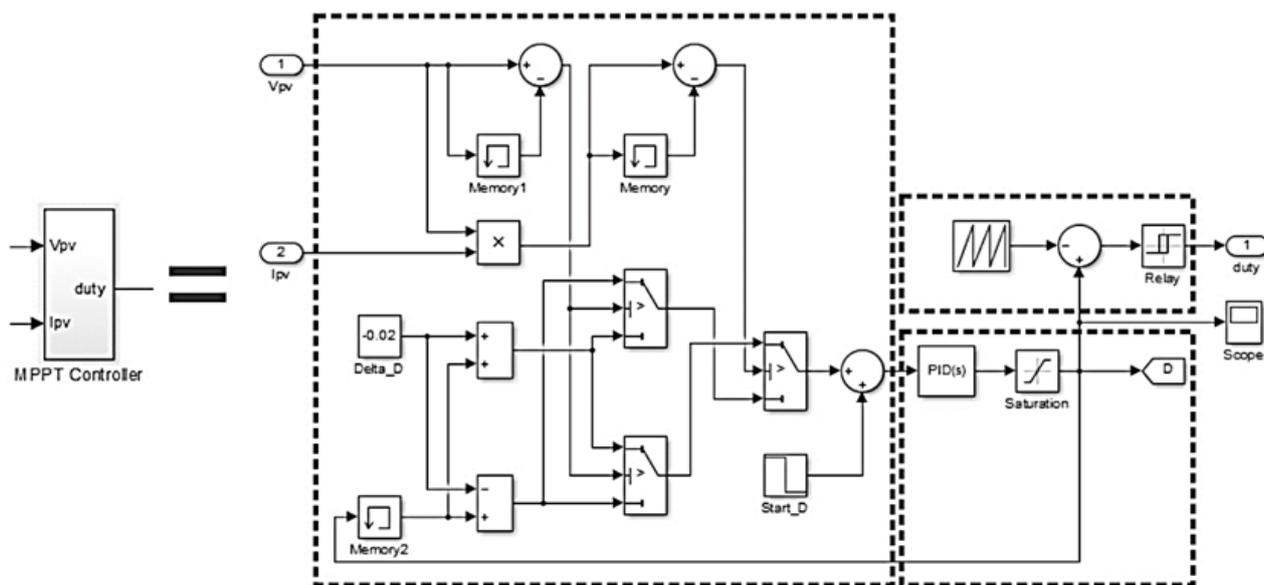


Рис. 8. Модель контроллера ПТММ, реализующего метод случайных возмущений, в MATLAB/Simulink
 Fig. 8. Model of the controller maximum power point tracking (algorithm of perturb and observe) in the MATLAB/Simulink

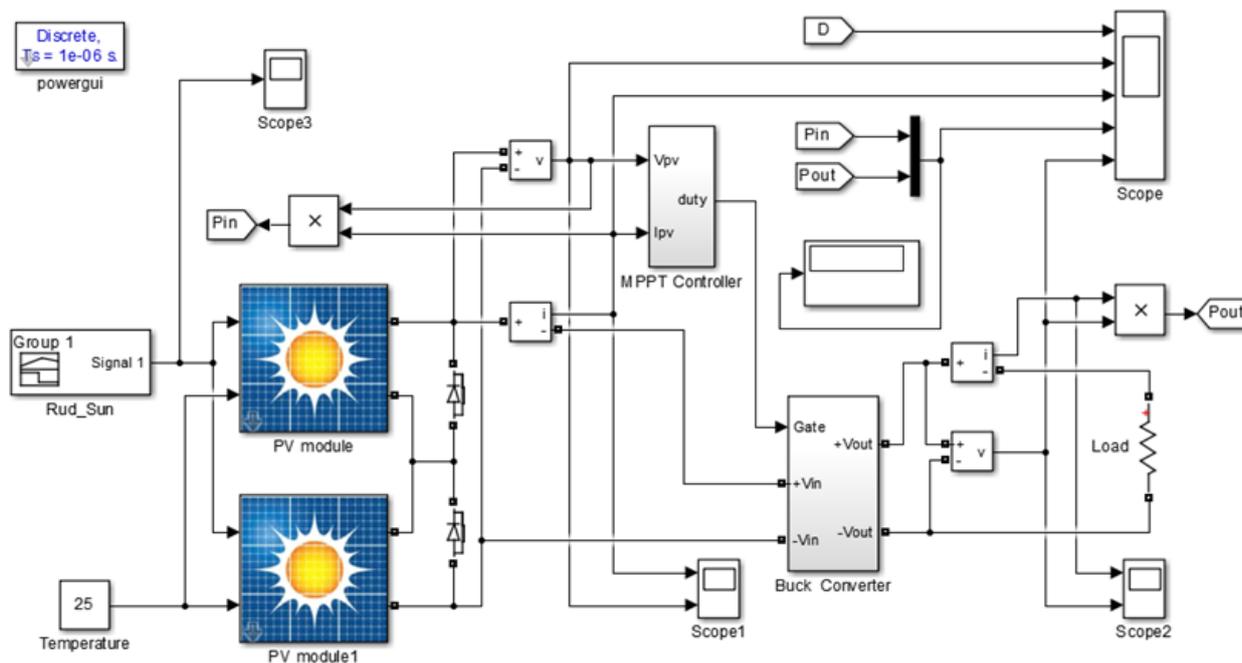


Рис. 9. Модель фотоэлектрической системы в MATLAB/Simulink
 Fig. 9. Model of a photovoltaic plant in the MATLAB/Simulink

Результаты моделирования

Для анализа режимов работы ФЭС использовались тестовые зависимости изменения освещенности и температуры СБ, приведенные на рис. 10. Сформированный тестовый сигнал освещенности СБ позволяет оценить динамическую эффективность кон-

троллеров ПТММ при изменении уровней освещенности от низкого до среднего (от 100 до 500 Вт/м²) и от среднего до высокого (от 300 до 1000 Вт/м²) значений, что предусмотрено требованиями европейского стандарта EN50530.

Температурный тест используется для оценки статической эффективности контроллеров ПТММ

при работе в широком диапазоне изменения температур. Для сокращения времени расчетных экспериментов градиент изменения температуры принят высоким (до 120 °C/c), что невозможно в реальных условиях эксплуатации, однако с точки зрения качественной оценки результатов данное допущение является вполне приемлемым.

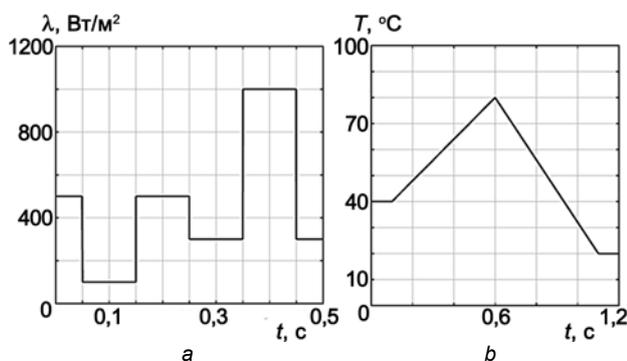


Рис. 10. Тестовые сигналы изменения освещенности и температуры СБ: а – изменение солнечной радиации; б – изменение температуры

Fig. 10. Test signals: a – solar radiation; b – temperature

Параметры регуляторов всех контроллеров ПТММ оптимизированы в соответствии с рекомендациями, приведенными в [33], временной интервал для метода напряжения холостого хода принят равным 0,1 с, что позволяет провести оценку его эффективности для принятого в расчетах градиента изменения температуры. Величина сопротивления нагрузки во всех экспериментах оставалась неизменной и равной $R_L = 5$ Ом.

При проведении расчетных экспериментов фиксировались следующие параметры рабочего режима ФЭС:

- коэффициент заполнения импульсов преобразователя D ;
- выходное напряжение солнечной батареи V_{PV} , В;
- выходной ток солнечной батареи I_{PV} , А;
- мощность солнечной батареи P_{PV} и мощность нагрузки P_L соответственно, Вт;
- напряжение на нагрузке V_L , В.

На рис. 11 представлены результаты расчетных экспериментов по оценке эффективности работы контроллеров ПТММ в условиях постоянной температуры СБ ($T = 25$ °C) и изменения освещенности по тестовому сигналу (рис. 10, а).

Анализ результатов, представленных на рис. 11, показывает, что все типы рассматриваемых в данной статье контроллеров обеспечивают устойчивую работу при изменении освещенности СБ, но ТММ, в зависимости от используемого алгоритма, отслеживается по-разному.

В контроллере, использующем алгоритм метода постоянного напряжения, независимо от уровня освещенности на выходе СБ поддерживается постоянное напряжение, равное заранее заданному опорному

(для рассматриваемой СБ величина опорного напряжения принята равной $V_{REF} = 30$ В), и ТММ определяется с некоторым приближением. Анализ вольт-ваттных характеристик СБ (рис. 5) показывает, что при изменении в широких пределах значений освещенности величина V_{MPP} изменяется незначительно и точность определения ТММ достаточно высокая. Так, в проведенном эксперименте погрешность определения максимальной выходной мощности СБ составила не более 7% в сравнении с поисковыми алгоритмами.

В контроллере, использующем алгоритм метода напряжения холостого хода, производится периодическая коррекция величины опорного напряжения по результатам измерения величины напряжения холостого хода СБ (для рассматриваемой СБ величина коэффициента пропорциональности между V_{MPP} и V_{OC} принята равной $K = 0,76$). Это позволяет более точно определять ТММ – в рассматриваемом эксперименте погрешность определения максимальной выходной мощности СБ составила не более 2%. Однако периодический перевод СБ в режим холостого хода приводит к потерям энергии, и для контроллеров данного типа важно правильно установить период измерения V_{OC} , который определяется на основе компромисса между неизбежными потерями энергии в режимах измерения V_{OC} и возможными потерями в режимах работы преобразователя с нескорректированными значениями V_{MPP} .

Проведенные расчетные эксперименты показали, что поисковые алгоритмы позволяют достаточно точно отслеживать ТММ, однако им также присущ ряд недостатков.

На представленных на рис. 11 осциллограммах хорошо видны колебания выходного напряжения СБ в ФЭС, использующей контроллер с алгоритмом метода случайных возмущений, особенно в условиях слабой освещенности ($\lambda = 200$ Вт/м²). Обусловлено это тем, что вольт-ваттные характеристики СБ при низкой освещенности становятся пологими и небольшая коррекция выходной мощности СБ приводит к значительным изменениям величины напряжения.

В контроллерах, использующих алгоритм метода приращения проводимости, для устойчивой работы в ТММ используют зону нечувствительности на разности между отношениями тока к напряжению СБ и их производных (в рассматриваемом примере величина зоны нечувствительности принята равной 0,02). Чрезмерное уменьшение величины данной зоны будет приводить к колебаниям рабочего режима, а увеличение – к возможным ошибкам в определении ТММ при низкой освещенности. В приведенных на рис. 11 осциллограммах видно, что в ФЭС, использующей контроллер с алгоритмом метода приращения проводимости, при принятой величине зоны нечувствительности обеспечивается устойчивый режим работы в ТММ, однако при $\lambda = 200$ Вт/м² она определяется с заметной погрешностью.

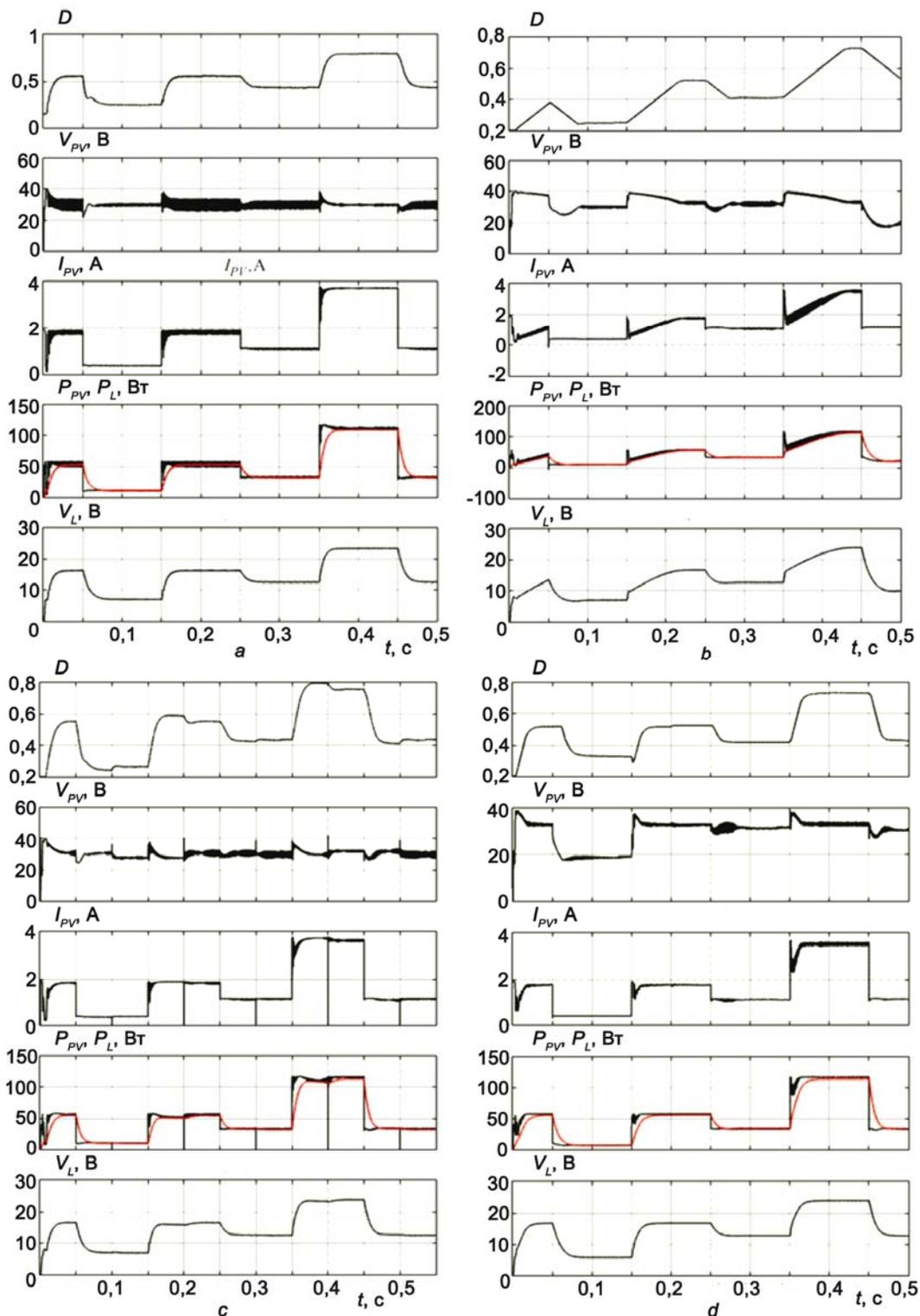


Рис. 11. Параметры рабочего режима ФЭС при изменении освещенности СБ:
 а – метод постоянного напряжения; б – метод напряжения холостого хода;
 с – метод случайных возмущений; д – метод приращения проводимости
 Fig. 11. Parameters photovoltaic plant operating mode when changing light solar battery:
 а – DC voltage method; б – no-load method; с – the method of random disturbances;
 д – conductance increment method



На рис. 12 представлены результаты расчетных экспериментов по оценке эффективности работы контроллеров ПТММ в условиях постоянной освещенности СБ ($\lambda = 800 \text{ Вт/м}^2$) и изменении их температуры по тестовому сигналу (рис. 10, b).

Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что контроллеры, использующие поисковые алгоритмы, а также метод напряжения холостого хода, обеспечивают хорошее отслеживание ТММ в широком диапазоне изменения температуры СБ.

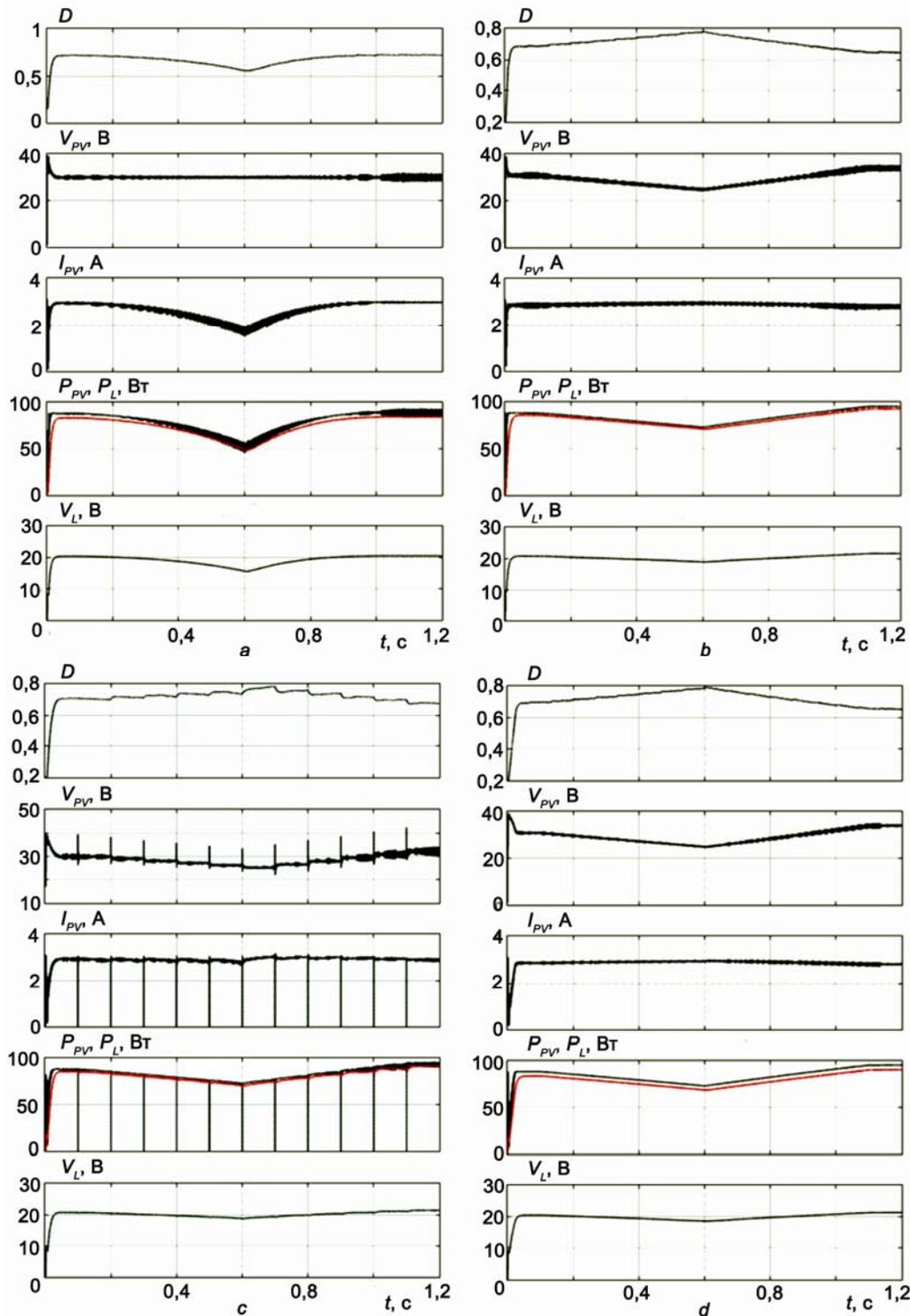


Рис. 12. Параметры рабочего режима ФЭС при изменении температуры СБ: а – метод постоянного напряжения; б – метод напряжения холостого хода; с – метод случайных возмущений; д – метод приращения проводимости
 Fig. 12. Parameters photovoltaic plant operating mode when the temperature of solar cell: a – DC voltage method; b – no-load method; c – the method of random disturbances; d – conductance increment method

Наибольшая погрешность в отслеживании ТММ соответствует методу постоянного напряжения. Вызвано это тем, что с увеличением температуры СБ значительно снижается величина напряжения в ТММ, а согласно алгоритму данного метода система управления контроллером пытается поддерживать напряжение на выходе СБ равным заданному опорному. Это приводит к тому, что при высоких температурах модулей величина коэффициента заполнения уменьшается, в то время когда она должна увеличиваться. Из результатов проведенных вычислительных экспериментов видно, что для принятых параметров моделирования максимальная погрешность в отслеживании ТММ соответствует температуре модулей в 80 °С, при этом величина выходной мощности СБ оказывается меньше максимально возможной на 32%.

Выводы

Для построения эффективных фотоэлектрических систем, адаптированных под конкретные условия эксплуатации, требуется произвести выбор определенной модели контроллера ПТММ с необходимыми характеристиками. Выбор осложняется большим разнообразием известных типов контроллеров, которые могут значительно отличаться друг от друга по целому ряду показателей.

В статье представлен обзор известных методов поиска ТММ, а также результаты моделирования режимов работы солнечной фотоэлектрической станции, включающей солнечную батарею, понижающий преобразователь и контроллеры ПТММ наиболее распространенных типов. Выполненный обзор различных методов поиска ТММ СБ и анализ их функционирования при различных климатических условиях может быть полезен широкому кругу специалистов в области фотоэнергетики. Все предложенные модели компонентов фотоэлектрических систем реализованы в MATLAB/Simulink, что позволяет использовать их после несложной доработки для исследования систем произвольной конфигурации с другими типами преобразователей и контроллеров ПТММ.

Список литературы (References)

1. Arnulf Jäger-Waldau. PV Status. Report 2013. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
2. Renewables 2014 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2015. URL: <http://www.ren21.net>.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. (Spravočnik po teorii avtomatičeskogo upravljenîa / Pod red. A.A. Krasovskogo. M.: Nauka, 1987.)

4. Официальный сайт ООО «МикроАРТ». URL: <http://www.invertor.ru/scontroller.html>. (Oficial'nyj sajt ООО «MikroART». URL: <http://www.invertor.ru/scontroller.html>).

5. Ali Reza Reisi, Mohammad Hassan Moradi, Shahriar Jamasb. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews 19 (2013), p. 433–443.

6. Nevzat Onat. Recent Developments in Maximum Power Point Tracking Technologies for Photovoltaic Systems // International Journal of Photoenergy, Volume 2010, p. 1-11.

7. Hohm D.P. and Ropp M.E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2003. № 11. P. 47–62.

8. Atallah A.M., Abdelaziz A.Y. and Jumaah R.S. Implementation of perturb and observe MPPT of PV system with direct control method using buck and buck-boost converters // Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering: An international Journal (EEIEJ), Vol. 1, No. 1, February 2014. P. 31-44.

9. Yuya Oshiro, Hikaru Ono, Naomitsu Urasaki. A MPPT Control Method for Stand-Alone Photovoltaic System in Consideration of Partial Shadow // IEEE PEDS 2011, Singapore, 5-8 December, 2011, p. 1010-1014.

10. Subudhi B., Pradhan R. A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems // IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, №4, p. 89-98.

11. Coelho R.F., Concer F.M., Martins D.C. A MPPT Approach Based on Temperature Measurements Applied in PV Systems // 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, 8-10 November, 2010, p. 1-6.

12. De Brito et al. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 3, march 2013, pp. 1156-1167.

13. Lijia Ren, Xiuchen Jiang, Gehao Sheng, Wu Bo. Design and calculation method for Dynamic Increasing Transmission Line Capacity // WSEAS Transactions on circuits and systems, Issue 5, Vol. 7, May 2008, p. 348-357.

14. Gomathy S., Saravanan S., Thangavel S. Design and Implementation of Maximum PowerPoint Tracking (MPPT) Algorithm for a Standalone PV System // International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 3, Issue 3, March - 2012, p. 1-7.

15. Sharma D.K., Purohit G. Hybrid Control Method for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Solar PV Power Generating System // Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 8(3) March 2014, p. 255-262.

16. Dolara A., Faranda R., Leva S. Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems // J. Electromagnetic Analysis & Applications. 2009. № 3. P. 152-162.



17. Sihem Amara, Adel Bouallegue, Adel Khedher. Theoretical and Practical Study of a Photovoltaic MPPT Algorithm Applied to Voltage Battery Regulation // International Journal of Renewable Energy Research. 2014. Vol. 4, No. 1. P. 83-90.
18. Prakash R., Meenakshipriya B., Kumaravelan R. Modeling and Design of MPPT Controller Using Stepped P&O Algorithm in Solar Photovoltaic System // International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering. 2014. Vol. 8, No. 3. P. 579-585.
19. Surya Kumari J., Sai Babu Dr. Ch., Kamalakar Babu A. Design and Analysis of P&O and IP&O MPPT Techniques for Photovoltaic System // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2012. Vol. 2, Issue. 4. P. 2174-2180.
20. Thulasiyammal C. and Sutha S. Design and comparative analysis of DC-DC boost and single-ended primary-inductance converter converters using solar powered maximum power point tracking algorithms // American Journal of Applied Sciences. 2014. № 11 (7). P. 1113-1122.
21. Choudhary D., Saxena A.R. DC-DC Buck-Converter for MPPT of PV System // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. Vol. 4, Issue 7. P. 813-821.
22. Makhoulfi M.T., Khireddine M.S., Abdessemed Y., Boutarfa A. Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic System using a Fuzzy Logic Controller on DC/DC Boost Converter // IJCSI International Journal of Computer Science Issues. 2014. Vol. 11, Issue 3. No. 2. P.1694-1672.
23. Chokri Ben Salah, Mohamed Ouali. Comparison of Fuzzy Logic and Neural Network in Maximum Power Point Tracker for PV Systems // Elsevier, Electric Power Systems Research. 2011. Vol. 81. P. 43-50.
24. Naoufel Khaldi, Hassan Mahmoudi, Malika Zazi, Youssef Barradi. Implementation of a MPPT Neural Controller for Photovoltaic Systems on FPGA Circuit // WSEAS Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 9. P. 471-478.
25. Babaa S.E., Armstrong M. and Pickert V. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems // Journal of Power and Energy Engineering. 2011. No. 2. P. 59-72.
26. Esmat T., Chapman P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2007. Vol. 22, No. 2. P. 439-449.
27. Dorofte C., Borup U., Blaabjerg F. A Combined Two-Method MPPT Control Scheme for Grid-Connected Photovoltaic Systems // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, 11-14 September, 2005.
28. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. (Raušenbah G. Spravočnik po proektirovaniu solnečnyh batarej. M.: Ènergoatomizdat, 1983.)
29. Hansen A.D., Sorensen P., Hansen L.H., Bindner H. Models for a stand alone PV system. Riso National Laboratory, 2000.
30. Bonkougou D., Koalaga Z., Njomo D. Modeling and Simulation of photovoltaic module considering single diode equivalent circuit model in MATLAB // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol. 3, Issue 3. P. 493-502.
31. Обухов С.Г., Плотников И.А. Модель солнечной панели в MATLAB SIMULINK // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2014. № 21 (161). С. 51-59. (Obuhov S.G., Plotnikov I.A. Model' solnečnoj paneli v MATLAB SIMULINK // A'l'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAEЕ. 2014. № 21 (161). С. 51-59.)
32. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. (Melešin V.I. Tranzistornaâ preobrazovatel'naâ tehnika. M.: Tehnosfera, 2005.)
33. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2013.

Транслитерация по ISO 9:1995

