

УДК: 621.314.632:572:472.001.5

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Михальченко Сергей Геннадьевич¹,
msg@ie.tusur.ru

Русскин Виктор Александрович¹,
vrsskn@gmail.com

Семенов Сергей Михайлович¹,
ssm@tpu.ru

Орлянский Илья Павлович¹,
orl_1996@mail.ru

Halász Sándor²,
halasz.sandor@vet.bme.hu

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 640050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Будапештский университет технологии и экономики,
Венгрия, H1118 Budapest, Egrý József u., 18.

Актуальность работы определяется необходимостью повышения показателей энергоэффективности силовых преобразовательных устройств для нужд альтернативной энергетики, в частности – для солнечной энергетики. Одна из проблем преобразования солнечной энергии в электрическую заключается в невысоком уровне энергетической эффективности этого процесса. Ввиду переменной величины освещенности солнечных панелей в суточном цикле, параметры получаемой энергии являются переменными, следовательно, настройки вторичных преобразователей электрической энергии должны быть адаптивными. Повышение качества функционирования альтернативных источников питания возможно за счет использования методов экстремального регулирования. В статье рассматриваются некоторые известные алгоритмы для системы управления повышающего преобразователя напряжения, реализующие поиск в пространстве рабочих параметров преобразователя точки максимальной мощности. Актуальной является задача выбора оптимального алгоритма из адаптивного (с подбором шага) и неадаптивного алгоритмов возмущения и наблюдения, при которых устройство варьирует полезное входное сопротивление преобразователя (путем изменения параметров широтно-импульсного модулятора или управляющего сигнала, формирующего входные величины напряжения, тока или мощности). Внесенные возмущения изменяют напряжение преобразователя, после измерения его выходных параметров производится следующий шаг возмущения-наблюдения. Кроме того, исследован алгоритм возрастающей проводимости, при котором преобразователь фиксирует динамику изменения тока и напряжения солнечной батареи для расчета параметров преобразователя с целью максимизации генерируемой мощности. Этот алгоритм является более требовательным к вычислительным ресурсам системы управления, но отслеживает изменение окружающих условий с большей скоростью. Проводится их сравнение и построение на их основе нового комбинированного алгоритма экстремального регулирования.

Цель работы: сравнение алгоритмов поиска точки максимальной мощности для автономной системы электропитания на основе солнечных батарей; разработка нового алгоритма для системы управления преобразователем напряжения, реализующего функцию экстремального регулирования; моделирование повышающего преобразователя напряжения в схеме преобразования энергии солнечных батарей с улучшенными показателями коэффициента полезного действия и быстродействия; создание физического макета конечного устройства и оценка его показателей.

Методы исследования: обзор литературных источников по типовым схемам преобразователей энергии солнечных батарей на основе DC-DC конвертеров и алгоритмам поиска точки максимальной мощности, сравнительный анализ имеющихся данных с использованием средств компьютерного моделирования. Использованы как методы имитационного моделирования с помощью программы Matlab/Simulink, так и макетирование с проведением соответствующих экспериментов: настройка ПИ-регулятора, имитация различных уровней затемнения солнечной батареи, оценка коэффициента полезного действия и времени переходного процесса преобразователя.

Результаты. Разработаны имитационные модели для метода возмущения и наблюдения (адаптивного и неадаптивного) и метода возрастающей проводимости, а также проведено сравнение их применения при различных уровнях освещенности. Составлено программное обеспечение для микропроцессорной системы управления двухфазным повышающим преобразователем напряжения, и проведен ряд опытов по имитации различных уровней освещенности солнечной батареи для оценки коэффициента полезного действия экспериментальной установки. Получены показатели коэффициента использования по мощности до величины, равной 99 % для варианта с адаптивным алгоритмом изменения шага. При экспериментальном исследовании достигнуты аналогичные показатели коэффициента использования по мощности, соответствующие 95–96 %, при времени квантования 10 мс (для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения).

Ключевые слова:

Альтернативные источники электроэнергии, солнечная энергетика, отслеживание точки максимальной мощности, метод возмущения и наблюдения, метод возрастающей проводимости, повышающий преобразователь напряжения.

Введение

Важная черта существующей единой энергетической системы (ЕЭС) России – высокая степень централизации: около 90 % общего количества электроэнергии производится крупными электростанциями, которые выдают энергию в разветвленную электрическую сеть. При этом такая концентрация характерна для густонаселенных регионов европейской части страны и ряда областей Сибири. Большая часть России (около 60 % территории с 10 млн населения) не присоединена к централизованной энергетической системе. Они получают электроэнергию в основном от автономных дизельных генераторов небольшой мощности. Негативная сторона такой ситуации – существенные затраты на транспорт и значительные потери при транспортировке и передаче энергии или энергоносителя на большие расстояния.

Таким образом, развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является приоритетной стратегической задачей, поскольку это направление не только экономически целесообразно, влечет за собой актуальную для российской экономики модернизацию производства, но и ведет к экологическим и социальным выгодам.

Повышение экологической безопасности энергетического производства, внедрение местных и возобновляемых ресурсов увеличивает также финансовую устойчивость регионов, поскольку и ископаемые, и возобновляемые ресурсы энергетики распределены по территории страны неравномерно. ВИЭ, являясь местными рассредоточенными энергетическими ресурсами, могут быть эффективно использованы для такого децентрализованного энергоснабжения. Также внедрение возобновляемых источников энергии дает возможность повысить степень самостоятельности автономных предприятий, снизить финансовую нагрузку на них. Развитие рынка возобновляемых энергоресурсов и местного топлива в качестве одной из стратегических целей России закрепила принятая в 2003 г. «Энергетическая стратегия России».

«Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии» была утверждена распоряжением правительства РФ от 8 января 2009 г. В данном документе определены целевые показатели объемов ввода установленных мощностей генерирующих объектов, функци-

онирующих на основе ВИЭ. Всего предполагается ввести 5871 МВт установленной мощности объектов возобновляемых источников энергии, из которых 3600 МВт (или 61 %) приходятся на ветрогенерацию, 1520 МВт (26 %) – на солнечную энергетику и 751 МВт (13 %) – на гидроэнергетику малых мощностей. При этом, в соответствии с программой развития ЕЭС России на 2013–2019 гг., установленная мощность электрических станций к 2019 г. прогнозируется на уровне 238 ГВт. Таким образом, целевые показатели объемов ввода объектов генерации на основе возобновляемой энергетики должны обеспечить долю 2,5 % в структуре установленной мощности ЕЭС России [1].

Структура источников солнечной энергии малой мощности

Расширение использования источников солнечной энергии малой мощности в домовых, коллективных и индивидуальных хозяйствах, в том числе автономных объектов, крайне важны сегодня. Применение подобных решений должно стать основой увеличения доли возобновляемой энергетики в энергобалансе субъекта Федерации – на основе выбора оптимального сочетания доступных для данной местности источников энергии и использования их с максимальной эффективностью. Этот выбор будет осуществляться потребителем и неминуемо станет мощным фактором развития рынка энергетических услуг [1–4].

Авторами были проведены исследования на основе преобразователя напряжения с экстремальным регулированием (ПНЭР) повышающего типа, применяемого в системах энергообеспечения малой мощности, разработанного ООО «ФреКон» (г. Томск, Россия), варианты структурных схем которого приведены на рис. 1. Первичным источником энергии здесь выступает солнечная батарея (СБ), аккумулятирование энергии обеспечивает зарядно-разрядное устройство (ЗРУ) аккумуляторной батареи (АБ), инвертор (АИ, ИВС) осуществляет преобразование постоянного напряжения в однофазное переменное.

Структура инвертора для солнечных батарей, называемого солнечным инвертором, может быть реализована как в виде автономного инвертора (АИ) для автономных потребителей (рис. 1, а), так и – инвертора, ведомого сетью (ИВС), питающего потребителя, подключенного к промышленной однофазной сети (рис. 1, б). Показанные структуры

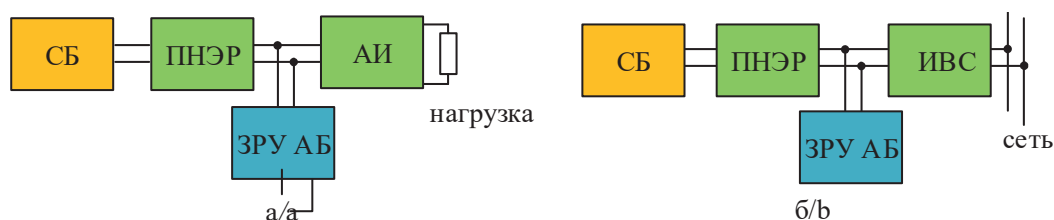


Рис. 1. Структурные схемы систем энергообеспечения с: а) автономным инвертором; б) инвертором, ведомым сетью

Fig. 1. Chain diagram of an: a) off-line; b) on-line electric power supply system based on solar batteries

наиболее перспективны для использования физическими лицами и малыми частными предприятиями по массогабаритным показателям, КПД и стоимости [5].

Для расширения диапазона работы системы энергопитания в качестве промежуточного звена между СБ и инвертором (АИ или ИВС) используется преобразователь постоянного напряжения с экстремальным регулированием, который производит отслеживание точки максимальной мощности (*maximum power point tracking* – MPPT). Типовая структурная схема ПНЭР приведена на рис. 2. Подобная схема обеспечивает высокий КПД за счёт снижения количества силовых элементов и реализации мягкой коммутации (*Zero Voltage Switching* – ZVS, *Zero Current Switching* – ZCS), при этом массогабаритные показатели фильтра минимизируются высокими частотами преобразования.

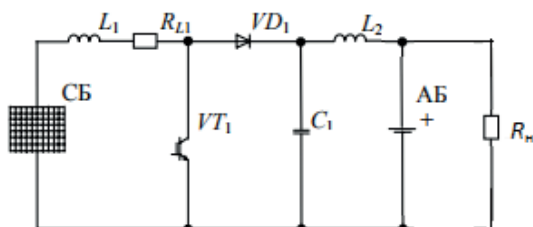


Рис. 2. Структурная схема повышающего преобразователя напряжения

Fig. 2. Electrical diagram of a boost DC-DC converter

Одним из основных способов повышения энергетической эффективности фотоэлектрических установок является реализация режима отбора максимума мощности (экстремального регулирования) в соответствующей точке вольтамперной характеристики (ВАХ) солнечной батареи [6, 7]. В связи с существенной сложностью выражений, описывающих ВАХ реальной СБ, использована достаточно простая математическая модель СБ, предложенная в [8], где ВАХ задана тремя характерными точками: напряжением холостого хода U_{xx} , током короткого замыкания $I_{кз}$, оптимальными значениями тока I_0 и напряжения U_0 :

$$I_{CB} = I_{K3} \left[1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{K3}} \right)^{\frac{U_{XX} - U_{CB}}{U_{XX} - U_0}} \right]. \quad (1)$$

На рис. 3 приведены примеры построенных по формуле (1) вольтамперных и вольтваттных характеристик (ВВХ) фотоэлектрической панели Kyocera KC200GT [6].

Повышающий преобразователь (рис. 2) имеет на входе дроссель L_1 , обеспечивающий непрерывность входного тока и стабильность рабочей точки ВАХ по току. При этом происходит увеличение напряжения на всем диапазоне регулирования, что приводит к необходимости использования байпаса для предотвращения превышения выходного напряжения. Учитывая топологию функциональной схемы конечной системы энергообеспечения (рис. 1), наиболее приемлемым вариантом является применение именно этого технического решения. Из всех приведенных в [9–13] типов преобразователей самым высоким КПД обладает рассматриваемый ПНЭР.

Обзор существующих алгоритмов управления

Для оптимизации выходной мощности солнечных панелей, как правило, используется один из известных алгоритмов [14–19]. В упомянутых устройствах для отслеживания точки максимальной мощности реализуют несколько алгоритмов: метод возмущения и наблюдения (рис. 4, а), а также методы возрастающей проводимости (рис. 4, б) и постоянного напряжения [18–21].

При использовании алгоритма возмущения и наблюдения (АВН) устройство на небольшую величину (шаг) изменяет эквивалентное входное сопротивление преобразователя (путём варьирования скважности силового ключа или задания на входные величины напряжения, тока или мощности), вследствие чего изменяется напряжение на СБ и далее производится измерение её выходных параметров (рис. 4, а). Если мощность увеличивается – контроллер продолжает изменять задающий параметр в этом же направлении, пока мощность не перестанет возрастать. Данный метод является наи-

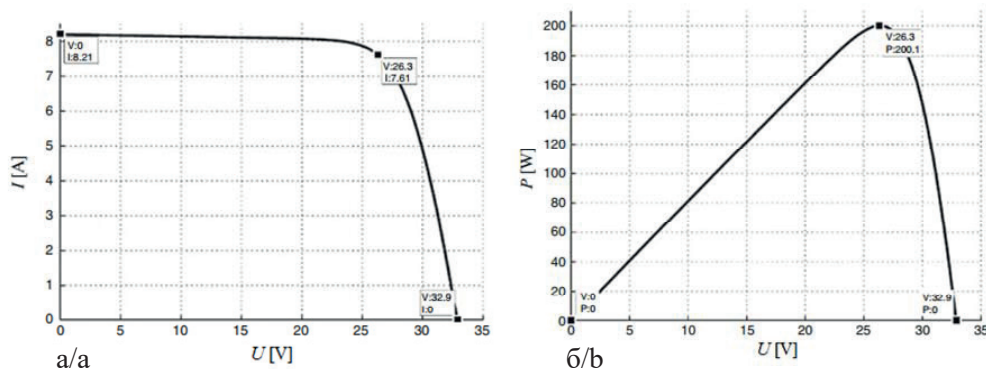


Рис. 3. Характеристики а) ВАХ и б) ВВХ солнечной панели Kyocera KC200GT

Fig. 3. Characteristics of solar panel Kyocera KC200GT

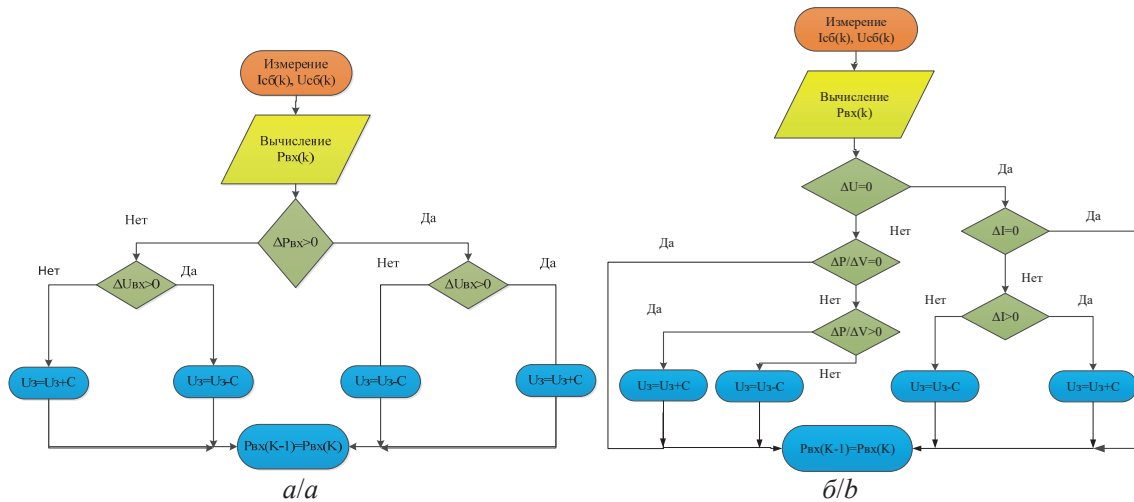


Рис. 4. Блок-схемы алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности: а) методом возмущения и наблюдения; б) методом возрастающей проводимости

Fig. 4. Block diagram of MPPT algorithms: a) perturbation and observation; b) incrementing conductance

более простым в реализации, но приводит к избыточным колебаниям мощности. Широкое применение этого метода обусловлено его простотой и может быть реализовано на основе функциональной схемы системы управления ПНЭР, приведенной на рис. 5 [14, 18].

Адаптивный АВН основан на изменении шага задания на входное напряжение для каждой итерации. Если на предыдущем шаге мощность увеличивалась, а на текущем начала уменьшаться, то шаг приращения сокращается.

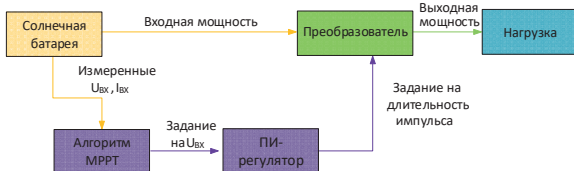


Рис. 5. Функциональная схема системы управления ПНЭР

Fig. 5. Chain diagram of a boost DC-DC converter control system

В алгоритме возрастающей проводимости (АВП) преобразователь фиксирует увеличение тока и напряжения СБ, чтобы предсказать эффект от изменения напряжения. Он требует увеличения вычислений, но при этом отслеживает изменение окружающих условий с большей скоростью, чем предыдущий метод. Этот способ также приводит к колебаниям мощности. Рассматриваемый метод использует возрастающую проводимость $\partial I / \partial U$ солнечной батареи для вычисления знака изменения мощности по отношению к напряжению $\partial P / \partial U$. При этом (рис. 4, б) вычисляется точка максимальной мощности и производится сравнение возрастающей проводимости $\partial I / \partial U$ с проводимостью СБ (I / U). При выполнении условия $I / \partial U = I / U$ выходное напряжение равно напряжению, соответствующему наибольшему значению мощности. Параметры ПИ-регулятора системы

управления по напряжению поддерживаются, пока не изменится уровень освещенности, далее процесс повторяется.

Результаты моделирования

На рис. 6 представлена имитационная модель системы отслеживания точки максимальной мощности с повышающим преобразователем. В работе [18] рассматривается модель, для которой преобразователь заменён переменным сопротивлением, величина которого регулируется динамически с помощью одного из алгоритмов (рис. 4), аналогично линеаризации в работе [20]. Представленная схема отличается наличием модели преобразователя, замкнутой по обратной связи. На базе данной модели проводится программирование алгоритмов экстремального регулирования (рис. 4), что позволяет получить более верифицируемые данные, приближающиеся по параметрам к реальным показателям прибора. Ухудшение экспериментальных результатов по пульсациям выходного напряжения, по сравнению с линеаризованной моделью, тоже связано с этим [18].

При моделировании разных уровней освещенности используются характеристики ВАХ и ВВХ модели СБ, рассчитанные по выражению (1) для фотоэлектрической панели Kyocera KC200GT (рис. 3), приведенные на рис. 7. Режим освещенности, обозначенный на данном рисунке цифрой {1}, соответствует 400 лк при мощности порядка 700 Вт, режим {2} с освещенностью 800 лк имеет мощность около 1100 Вт. Режим {3}, так же как и режим {1}, имеет освещенность 400 лк и мощность 700 Вт, это необходимо для анализа переходных процессов с низкой освещенности на высокую и наоборот. Четвертый режим {4} соответствует 200 лк и мощности 400 Вт.

В результате имитационного моделирования получены графики выхода на рабочую точку и определение новых максимумов мощности при изменении

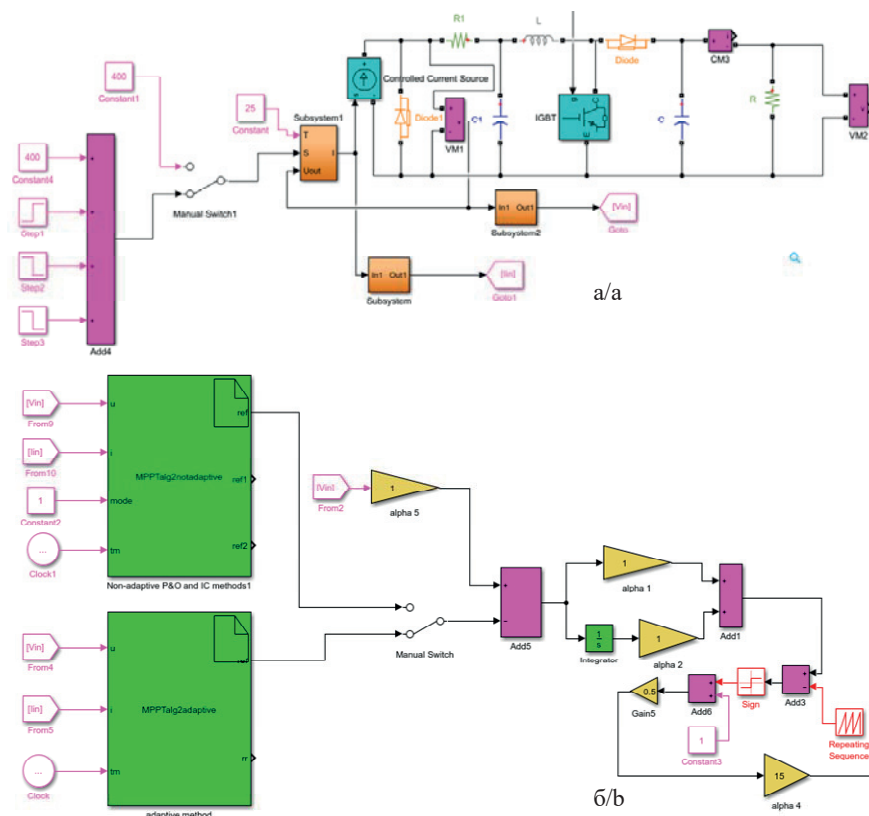


Рис. 6. Имитационная модель для отладки алгоритмов МРРТ: а) силовая цепь и блок переключения режимов освещенности; б) система управления с алгоритмами экстремального регулирования

Fig. 6. Simulation model for adjustment of MPPT algorithms: a) power circuit and the switching unit of illumination modes; b) control system with algorithms of extreme regulation

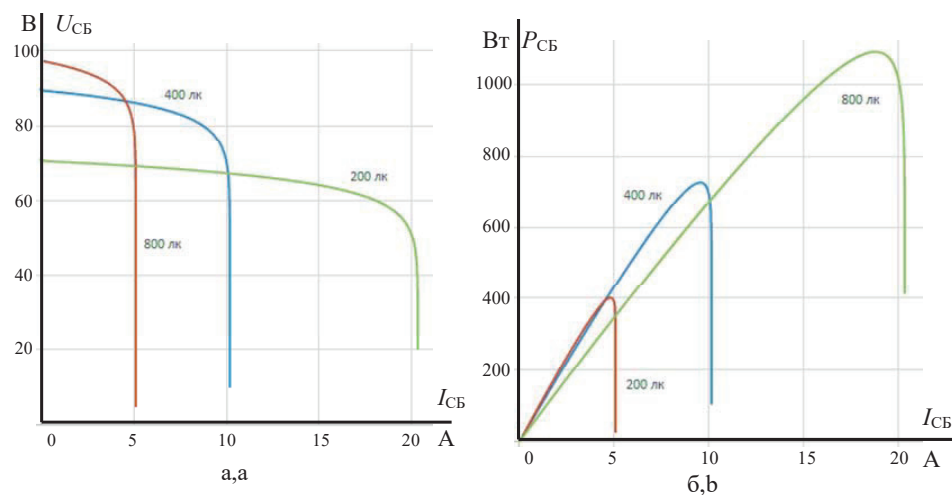


Рис. 7. Характеристики модели СБ: а) ВАХ; б) ВВХ

Fig. 7. Characteristics of solar panel: a) current voltage; b) power voltage

величины освещённости солнечной панели. На рис. 8 представлена диаграмма мощности (P_{CB}) солнечной батареи для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения, из которой видно, что требуемого уровня максимума мощности преобразователь не достигает. Здесь в момент времени 0–0,4 с уровень освещенности составляет 400 лк. Далее уровень ос-

вещенности увеличивается в 2 раза и становится равным 800 лк (0,4–1 с). Затем уровень освещенности становится опять 400 лк (1–1,5 с). И в конце уменьшается до 200 лк (1,5–2 с).

Адаптивный АВН реализован (рис. 4, а) в соответствии с методом возмущения и наблюдения, кроме того, в нем используется изменение шага задания

на входное напряжение для каждой итерации. Если на предыдущем шаге мощность увеличилась, а на текущем – уменьшилась, то шаг приращения сокращается. Ниже приведены временные диаграммы мощности (рис. 9) для адаптивного алгоритма возмущения и наблюдения, в котором осуществляется выход на рабочую точку, в соответствии с режимами.

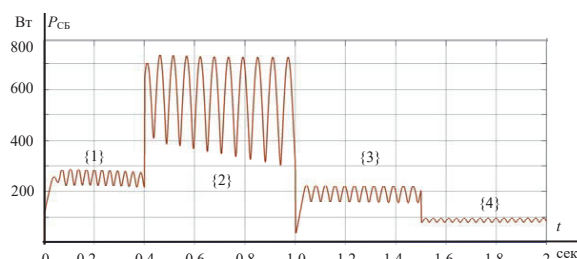


Рис. 8. Диаграмма мощности СБ для неадаптивного АВН

Fig. 8. Power diagram of solar panel for non-adaptive perturbation and observation method

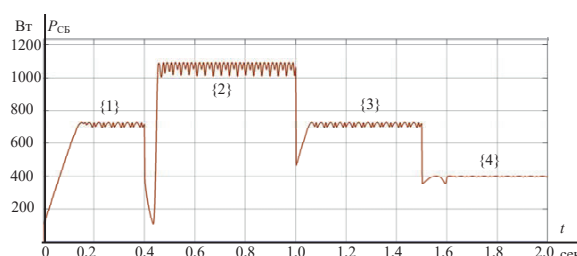


Рис. 9. Диаграмма мощности СБ для адаптивного алгоритма возмущения и наблюдения

Fig. 9. Power diagram of solar panel for adaptive perturbation and observation method

Рассмотренные алгоритмы нацелены в первую очередь на отыскание локальных максимумов мощности СБ. Все они предполагают колебания мощности, которые могут быть снижены с помощью введения алгоритмов изменения шага, один из которых (адаптивный, возмущения и наблюдения) описан выше. Алгоритм возрастающей проводимости гораздо быстрее отрабатывает изменения освещённости, однако для корректной работы необходимо производить больше арифметических операций на каждом такте его работы. К недостаткам данного метода также можно отнести высокую чувствительность к помехам и изменению шага.

Для сравнения произведен расчет коэффициентов пульсации по напряжению ($k_{\text{ну}}$) и по мощности ($k_{\text{пр}}$) для исследуемых алгоритмов по приведенным ниже формулам.

$$k_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}}; k_{\text{ну}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}. \quad (2)$$

В табл. 1 представлены значения коэффициентов пульсации по мощности ($k_{\text{пр}}$) и по напряжению ($k_{\text{ну}}$) для адаптивного и неадаптивного алгоритма. Рассчитанные по выражению (2) показатели демонстрируют превосходство адаптивного АВН.

Таблица 1. Коэффициент пульсации мощности и напряжения
 Table 1. Ripple ratio of power and voltage

Интервал освещенности Interval of illumination	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{ну}}$	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{ну}}$
	Неадаптивный АВН Non-adaptive perturbation method	Адаптивный АВН Adaptive perturbation method	Неадаптивный АВН Non-adaptive perturbation method	Адаптивный АВН Adaptive perturbation method
1	0,145	0,14	0,022	0,066
2	0,416	0,405	0,039	0,101
3	0,183	0,2	0,02	0,066
4	0,099	0,101	0,01	0,04

Для каждого из рассматриваемых режимов был проведен расчет коэффициента использования по мощности для нахождения локального экстремума ВВХ в рабочей точке по следующему закону:

$$\nu = \frac{P'_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Результаты расчетов по выражению (3) приведены на рис. 10.

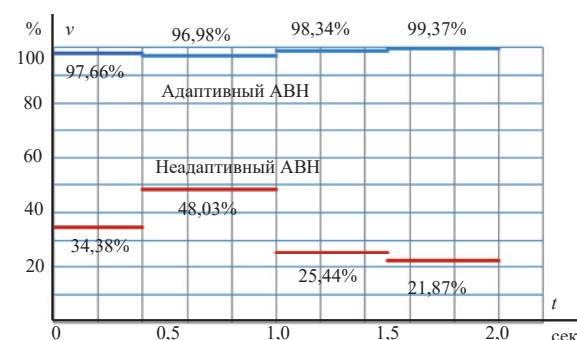


Рис. 10. Коэффициент использования по мощности

Fig. 10. Power operational factor

Время переходного процесса – выхода на точку максимальной мощности – рассчитано с учетом результатов численного эксперимента (рис. 6) для адаптивного и неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения (рис. 4, а). Результаты расчетов приведены на рис. 11 с указанием времени выхода на точку максимальной мощности.

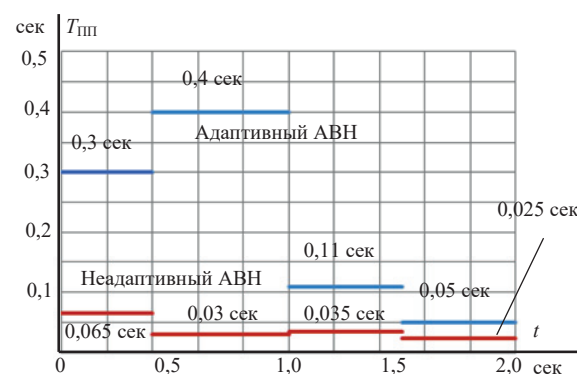


Рис. 11. Время выхода на точку максимальной мощности

Fig. 11. Transient time of MPPT

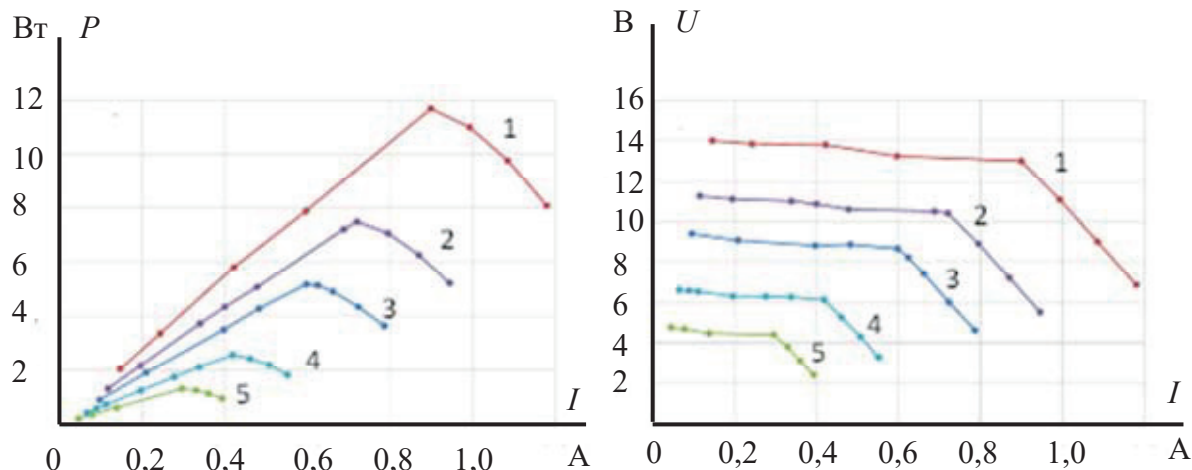


Рис. 12. Характеристики нелинейного источника питания: а) ВВХ; б) ВАХ

Fig. 12. Characteristics of non-linear power source: a) power voltage characteristic; b) current voltage characteristic

Экспериментальные исследования

Опыты проводились с использованием звена постоянного тока системы энергообеспечения, представляющего собой два параллельно включенных повышающих преобразователя напряжения. Автономная система электропитания предоставлена ООО «ФреКон» (г. Томск, Россия).

Для получения нелинейной ВАХ использовался лабораторный источник питания GW Instek PSP-603. Этот тип источника позволяет формировать прямоугольные вольтамперные характеристики. Для получения наиболее близких по виду ВАХ и ВВХ к соответствующим характеристикам СБ (рис. 7) было реализовано, согласно выражению (1), последовательное и параллельное подключение сопротивлений между источником питания и ПНЭР. Опытные вольтамперные $U=f(I)$ и вольтваттные $P=f(I)$ характеристики изображены на рис. 12.

В табл. 2 приведены значения входных токов и напряжений, соответствующих точкам максимальной мощности для каждой вольтамперной характеристики вышеприведенного рисунка.

Таблица 2. Входные токи и напряжения для каждой ВАХ

Table 2. Input currents and voltages for each characteristic

Интервал освещенности Illumination interval	I_{MAX} , А	U_{MAX} , В/В	P_{MAX} , Вт/Вт
1	0,9	13	11,687
2	0,72	10,41	7,49
3	0,6	8,66	5,17
4	0,42	6,12	2,55
5	0,3	4,4	1,24

В алгоритме, примененном в макете, возмущение реализуется через изменение задания на входное напряжение преобразователя, которое обрабатывается ПИ-регулятором.

Частота вызова алгоритма экстремального регулирования выбиралась исходя из динамических свойств замкнутой системы управления. Из дан-

ных осциллограмм видно, что время переходного процесса входного напряжения соответствует 10 мс. Исходя из этого выбирается частота вызова алгоритма – не выше 100 Гц [18].

На рис. 13 приведена осциллограмма работы алгоритма при запуске и переходе между характеристиками источника питания.

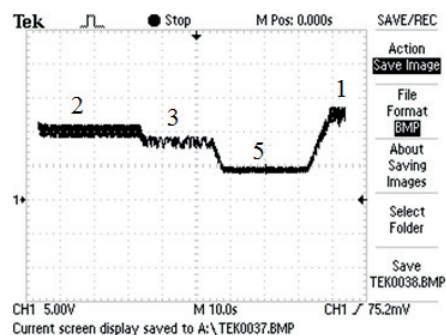


Рис. 13. Осциллограмма работы алгоритма при имитации изменения освещенности

Fig. 13. Oscillogram of algorithm implementation when simulating illumination changes

На данном рисунке цифрами обозначена работа ППН на соответствующих ВАХ (рис. 12). Расчет коэффициента использования для нахождения экстремума мощности был проведен в соответствии с соотношением (4), результаты для каждой ВАХ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициент использования по мощности

Table 3. Efficiency for different levels of illumination

Обозначение интервала Interval	Коэффициент использования по мощности, % (эксперимент) Efficiency, %
2	96,93
3	95,8
5	95,2
1	95,73

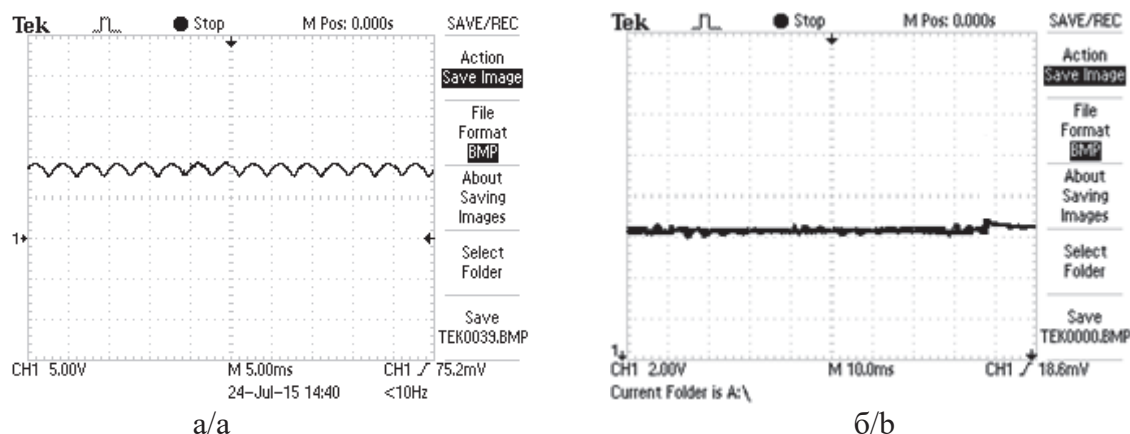


Рис. 14. Осциллограммы колебания входного напряжения источника при работе алгоритмов: а) неадаптивного; б) адаптивного
 Fig. 14. Oscillograms of input voltage source pulsations for: a) non-adaptive algorithm; b) adaptive algorithm

На рис. 14 приведены осциллограммы колебания входного напряжения источника при работе алгоритмов. Здесь величина пульсаций показывает, что потери мощности связаны в первую очередь с колебаниями задания на входное напряжение (рис. 14, а). Их можно избежать, если использовать адаптивный алгоритм изменения шага возмущения по мере приближения к отслеживаемой точке (рис. 14, б). При испытании адаптивного алгоритма величина коэффициента использования по мощности составила 98–99 % [18].

Применяя комбинацию адаптивного алгоритма возмущения и наблюдения (с подбором шага) и алгоритма возрастающей проводимости, может быть построен *адаптивный интеллектуальный алгоритм управления ПНЭР*, позволяющий гибко подходить к задаче экстремального регулирования – в тех задачах, где быстроедействие важнее точности использования по мощности, использовать АВП, а там, где важнее точность использования по мощности – адаптивный АВН.

Возможна реализация также последовательного алгоритма, использующего на первых шагах АВП, а после переключающийся на адаптивный АВН [12, 15, 16, 18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии. Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 года № 1-р // Официальный сайт правительства РФ. URL: <http://government.ru/docs/20503/> (дата обращения: 20.12.2017).
2. Силовая электроника в энергопреобразующей аппаратуре альтернативной энергетики / Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, А.В. Миллер, В.В. Русанов // Электропитание. – 2012. – № 2. – С. 55–60.
3. Current state of nuclear fuel cycles in nuclear engineering and trends in their development according to the environmental safety requirements / I.S. Vislov, V.P. Pischulin, S.N. Kladiev, S.M. Slobodyan // Thermal engineering. – 2016. – V. 63. – Iss. 8. – P. 581–586.

Заключение

- Достигнутое значение коэффициента использования по мощности (95–96 %) для нахождения точки максимальной мощности при работе даже неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения удовлетворяет теоретическим и экспериментальным данным отечественных [8, 14, 18] и зарубежных [5, 9, 11, 12, 15–17] исследований.
- Для увеличения коэффициента использования по мощности (до 99 %) экстремального регулирования мощности наиболее приемлем алгоритм изменения шага регулируемого параметра (ток, напряжение, мощность СБ или скважность ключа) при определении максимума мощности.
- Метод возмущения и наблюдения является наилучшим, поскольку менее требователен к ресурсам микроконтроллера и, при реализации адаптивного алгоритма, обеспечивает высокий уровень коэффициента использования по мощности, низкие пульсации, сочетающиеся с достаточным быстроедействием.

Исследование проводится в Томском политехническом университете в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

4. Solar Energy: Trends and Enabling Technologies / V. Devabhaktuni, M. Alam, S.S.S. Reddy Depuru, R.C. Green II, D. Nims, C. Near // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – V. 19. – Iss. 3. – P. 555–556.
5. El Alami M., Habibi M., Bri S. Modeling the Chain of Conversion for a PV System // Smart Grid and Renewable Energy. – 2014. – V. 5. – Iss. 10. – P. 239–248.
6. Характеристики фотоэлектрического модуля Kyocera KC200GT // Kyocera Corporation. URL: <https://www.solarelectricsupply.com/kyocera-kc200gt-solar-panel-565> (дата обращения: 20.12.2017).
7. Характеристики фотоэлектрического модуля KSM-160 // ООО Квант. URL: www.rusnanonet.ru/download/nano/file/ksm160.pdf (дата обращения: 20.12.2017).
8. Сопоставительный анализ энергетической эффективности преобразования энергии солнечной батареи преобразователями

- постоянного напряжения / А.В. Осипов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – Т. 27. – № 1. – С. 14–19.
9. Saurav Staphy. Photovoltaic power control using MPPT and boost converter // National Institute of Technology Rourkela. – 2012. URL: http://ethesis.nitrkl.ac.in/3510/1/PHOTOVOLTAIC_POWER_CONTROL_USING_MPPT_AND_BOOST_CONVERTER.pdf (дата обращения: 20.12.2017).
 10. Mikhachenko G., Mikhachenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter // Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference. – 2015. – P. 1–7. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
 11. Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions / Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg // Contents of 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC 2006). – Portoroz, 2006. – V. 1. – P. 1614–1619.
 12. Manimekalai P., Harikumar R., Raghavan S. A Hybrid Maximum Power Point Tracking with Interleaved Converter for Standalone Photovoltaic Power Generation System // International Energy Journal. – 2014. – V. 14. – Iss. 12. – P. 143–154.
 13. Mikhachenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016) Conference Proceedings. – Erlagol, Russia, 2016. – P. 507–511.
 14. Автономная система электропитания с экстремальным регулированием мощности первичных источников энергии / О.А. Донцов, В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев, С.С. Пост // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 12. – С. 35–44
 15. Pradeep Kumar Yadav A., Thirumaliah S., Haritha G. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC converters based PV systems // Research & reviews. – 2013. URL: <http://www.rroij.com/open-access/comparison-of-mppt-algorithms-for-dcdeconverters-based-pv-systems.pdf> (дата обращения 22.12.2017).
 16. Saleh Elkelani Babaa, Matthew Armstrong, Volker Pickert. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems // Journal of Power and Energy Engineering. – 2014. – V. 2. – Iss. 8. – P. 59–71.
 17. Comprehensive analysis of maximum power point tracking techniques in solar photovoltaic systems under uniform insolation and partial shaded condition / Deepak Verma, S. Nema, A.M. Shandilya, S.K. Dash // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2015. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jrse/7/4/10.1063/1.4926844> (дата обращения 22.12.2017).
 18. Русский В.А., Семёнов С.М., Диксон Р.К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 78–87.
 19. Areen Abdallah Allataifeh, Khaled Bataineh, Mohamad Al-Khedher. Maximum Power Point Tracking Using Fuzzy Logic Controller under Partial Conditions // Smart Grid and Renewable Energy. – 2015. – V. 6. – Iss. 1. – P. 1–13.
 20. Shilin A.A., Bukreev V.G. Linearization of a heat-transfer system model with approximation of transport time delay // Thermal Engineering. – 2014. – V. 61. – Iss. 10. – P. 741–746.
 21. Aristov A.V., Nagorniy V.O., Gavrilov A.M. Voltage converter with the controlled energy balance for the electric drive with the pulsation motion mode // Control and Communications (SIBCON): International Siberian Conference. – Russia, Omsk, May 21–23, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146983.

Поступила 28.12.2017 г.

Информация об авторах

Михальченко С.Г., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и электрооборудования Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Русский В.А., аспирант кафедры электропривода и электрооборудования Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Семенов С.М., старший преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Орлянский И.П., студент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Halász Sándor, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии и экономики.

UDC: 621.314.632:572.472.001.5

CONSTRUCTION OF ADAPTIVE ALGORITHM OF POWER EXTREME CONTROL IN SOLAR ENERGY SYSTEM

Sergey G. Mikhailchenko¹,
msg@ie.tusur.ru

Viktor A. Russkin¹,
vrsskn@gmail.com

Sergey M. Semenov¹,
ssm@tpu.ru

Ilya P. Orlyanskiy¹,
orl_1996@mail.ru

Sándor Halász²,
halasz.sandor@vet.bme.hu

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 640050, Russia.

² Budapest University of Technology and Economics,
18, Eötvös u. H-1118 Budapest, Hungary.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to improve energy efficiency of DC-DC power converting devices for needs of alternative power engineering. One of the problems of converting solar energy into electrical one is a low level of energy efficiency of this process. Due to variable value of illumination of solar panels during the day, the parameters of energy received are variable, hence, the settings of secondary electrical energy converters must be adaptive. Improving the quality of functioning of alternative power sources is possible due to the use of methods of extreme regulation. The paper considers some famous algorithms for a control system of boosting voltage converter which implement the search for operating parameters of the converter of the maximum power point. The problem of choosing optimal algorithm from the adaptive (with the choice of step) and non-adaptive algorithms of disturbance and observation is relevant as well. In addition, the algorithm of increasing conductivity was investigated. Comparison and construction of these algorithms and a new combined algorithm of extreme regulation on their basis were carried out.

The main aim of the study is to compare the maximum power point search algorithms; develop a new algorithm for a voltage converter control system and physical model of the final device and estimate its efficiency.

The methods: reviewing of technical publications concerning maximum power point tracking algorithms; simulation modeling using Matlab/Simulink and certain experiments with a prototype of two-phase DC-DC boost converter. The experiments and modeling include: setup of PI-regulator, imitation of various levels of blackout of a solar battery, assessment of the converter efficiency.

The results. The authors developed the simulation models for adaptive and non-adaptive perturbation and observation and incremental conductance method and studied their application for different levels of illumination. The software for a microprocessor control system was designed. The authors carried out the experiments in simulation of different levels of illumination of the solar battery to estimate the efficiency of the device. The research demonstrates high value of maximum power point tracking efficiency (99 %) for option with adaptive algorithm of a step change. At the experiment the similar indicators of accuracy (95–96 %) were obtained, at quantization time of 10 ms (for not adaptive algorithm of perturbation and observation).

Key words:

Alternative energy, solar energy, maximum power point tracking, perturbation and observation method, incrementing conductance method, boost DC-DC converter.

The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program grant.

REFERENCES

1. Ob osnovnykh napravleniyakh gosudarstvennoy politiki v sfere povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektroenergetiki na osnove ispolzovaniya vobnovlyаемых istochnikov energii. Rasporyazhenie pravitelstva RF ot 8 yanvarya 2009, 1-p [On the main directions of the state policy in the sphere of increasing the energy efficiency of the electric power industry on the basis of the use of renewable energy sources. Order of the Government of the Russian Federation, January 8, 2009 No. 1-r]. *Ofitsialny sayt pravitelstva RF* [Official website of the government of the Russian Federation]. Available at: <http://government.ru/docs/20503/> (accessed 20 December 2017).
2. Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G., Miller A.V., Rusanov V.V. Power electronics in energy-transforming equipment of alternative energy. *Power supply*, 2012, no. 2, pp. 55–60. In Rus.
3. Vislov I.S. Pischulin V.P. Kladiev S.N. Slobodyan S.M. Current state of nuclear fuel cycles in nuclear engineering and trends in their development according to the environmental safety requirements. *Thermal engineering*, 2016, vol. 63, Iss. 8, pp. 581–586.
4. Devabhaktuni V., Alam M., Reddy Depuru S.S.S., Green II R.C., Nims D., Near C. Solar Energy: Trends and Enabling Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 19, Iss. 3, pp. 555–556.

5. El Alami M., Habibi M., Bri S. Modeling the Chain of Conversion for a PV System. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2014, vol. 5, Iss. 10, pp. 239–248.
6. Kharakteristiki fotoelektricheskogo modulya Kyocera KC200GT [Characteristics of photovoltaic module Kyocera KC200GT]. *Kyocera Corporation*. Available at: <https://www.solarelectricsupply.com/kyocera-kc200gt-solar-panel-565> (accessed 20 December 2017).
7. Kharakteristiki fotoelektricheskogo modulya KSM-160 [Characteristics of photovoltaic module KSM-160]. *Kvant Ltd*. 2013. Available at: www.rusnanonet.ru/download/nano/file/ksm160.pdf (accessed 20 December 2017).
8. Osipov A.V., Shurigin Yu.A., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M. A comparative analysis of DC-DC converters effectiveness of solar batteries power conversion. *Proceedings of Tomsk State University of Control systems and Radioelectronics*, 2013, vol. 27, Iss. 3, pp. 14–19. In Rus.
9. Saurav Stapathy. Photovoltaic power control using MPPT and boost converter. *National Institute of Technology Rourkela*. 2012. Available at: http://ethesis.nitrkl.ac.in/3510/1/PHOTOVOLTAIC_POWER_CONTROL_USING_MPPT_AND_BOOST_CONVERTER.pdf (accessed 20 December 2017).
10. Mikhailchenko G., Mikhailchenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter. *Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference*. P. 1–7. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
11. Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions. *Contents of 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC 2006)*. Portoroz, 2006. Vol. 1, pp. 1614–1619.
12. Manimekalai P., Harikumar R., Raghavan S. A Hybrid Maximum Power Point Tracking with Interleaved Converter for Standalone Photovoltaic Power Generation System. *International Energy Journal*, 2014, vol. 14, Iss. 12, pp. 143–154.
13. Mikhailchenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016) Conference Proc.* Erlagol, Russia, 2016. pp. 507–511.
14. Dontsov O.A., Ivanchura V.I., Krasnobaev Y.V., Post S.S. Autonomous power supply system with maximum power point tracking of primary energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 12, pp. 35–44. In Rus.
15. Pradeep Kumar Yadav A., Thirumaliah S., Haritha G. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC converters based PV systems. *Directory of open access journals*. 2013. Available at: <https://doaj.org/article/10517792b1d843e9b69779fb5560a214> (accessed 20 December 2017).
16. Saleh Elkelani Babaa, Matthew Armstrong, Volker Pickert. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, vol. 2, Iss. 8, pp. 59–71.
17. Deepak Verma, Nema S., Shandilya A.M., Dash S.K. Comprehensive analysis of maximum power point tracking techniques in solar photovoltaic systems under uniform insolation and partial shaded condition. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015. Available at: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jrse/7/4/10.1063/1.4926844> (accessed 22 December 2017).
18. Russkin V.A., Semenov S.M., Dickson R.K. Investigation of search algorithms for the point of maximum power for the boost converter of the solar inverter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 78–87. In Rus.
19. Areen Abdallah Allataifeh, Khaled Bataineh, Mohamad Al-Khedher. Maximum Power Point Tracking Using Fuzzy Logic Controller under Partial Conditions. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2015, vol. 6, Iss. 1, pp. 1–13.
20. Shilin, A.A., Bukreev, V.G. Linearization of a heat-transfer system model with approximation of transport time delay. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, Iss. 10, pp. 741–746.
21. Aristov A.V., Nagorniy V.O., Gavrilov A.M. Voltage converter with the controlled energy balance for the electric drive with the pulsation motion mode. *Control and Communications (SIBCON): International Siberian Conference*. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146983.

Received: 28 December 2017.

Information about the authors

Sergey G. Mikhailchenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor A. Russkin, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey M. Semenov, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ilya P. Orlyanskiy, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sándor Halász, Dr. Sc., professor, Budapest University of Technology and Economics.