

УДК 621.314.632:572:472.001.5

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИНВЕРТОРА

Русскин Виктор Александрович¹,
vrsskn@gmail.com

Семёнов Сергей Михайлович¹,
ssm@tpu.ru

Диксон Роберт Кристофер^{1,2},
robert_dixon@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 640034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Отдел энергетики ЮНЕСКО Карибского бассейна, Ямайка.

Актуальность работы определяется необходимостью повышения показателей энергоэффективности силовых преобразовательных устройств для нужд альтернативной энергетики. В настоящее время всё больше внимания уделяется альтернативным источникам энергии, в том числе солнечной энергетике, в связи ростом цен на невозобновляемые источники энергии. Однако генерирование солнечной энергии имеет ряд проблем, связанных со стоимостью фотопанелей, их утилизацией и несовершенством устройств преобразования энергии этих систем. Всё это требует создания источников питания на современной элементной базе и систем их управления, позволяющих достигать высоких показателей энергоэффективности. Для решения этих задач выбран метод поиска точки максимальной мощности повышающего преобразователя напряжения для солнечных источников энергии с использованием известных алгоритмов поиска.

Цель работы: исследование различных алгоритмов поиска точки максимальной мощности для систем на основе солнечных батарей; разработка структуры с наилучшими показателями коэффициента полезного действия и быстродействия на основе рассмотренных типовых схем преобразования энергии солнечных батарей и алгоритмов их управления; 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. Используются 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 преобразователя.

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

Ключевые слова:

Отслеживание точки максимальной мощности, метод возмущения и наблюдения, метод возрастающей проводимости, повышающий преобразователь напряжения, преобразователи энергии солнечных батарей.

Введение

Авторами были проведены исследования устройства на основе повышающего преобразователя (ППН), входящего в состав структуры инвертора для солнечных батарей как наиболее перспективного по массогабаритным показателям и КПД. Функциональная схема такой системы изображена на рис. 1 [1].

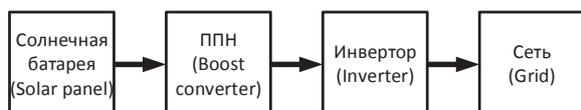


Рис. 1. Функциональная схема инвертора солнечных батарей

Fig. 1. Chain diagram of an off-line electric power supply system based on solar batteries

Для расширения диапазона работы солнечного инвертора в качестве промежуточного звена между солнечной батареей (СБ) и сетевым инвертором используется преобразователь постоянного напряжения, который также может производить отслеживание точки максимальной мощности (maximum power point tracking – MPPT), его структурная схема приведена на рис. 2. В качестве такого преобразователя энергии могут выступать понижающий, повышающий, инвертирующий преобразователи или преобразователь, выполненный по схеме Кука. Подобные схемы обеспечивают высокий КПД за счёт снижения количества силовых элементов, при этом массогабаритные показатели фильтра минимизируются высокими частотами

преобразования. Одним из основных способов повышения энергетической эффективности фотоэлектрических установок является реализация режима отбора максимума мощности в соответствующей точке вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечной батареи. На рис. 3 даны примеры ВАХ и вольт-ваттных характеристик (ВВХ) фотоэлектрической панели КСМ-160 [2].

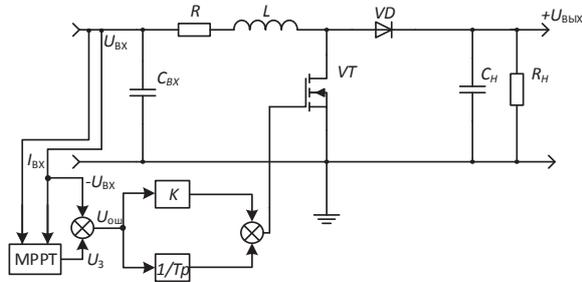


Рис. 2. Структура преобразователя энергии солнечных батарей

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

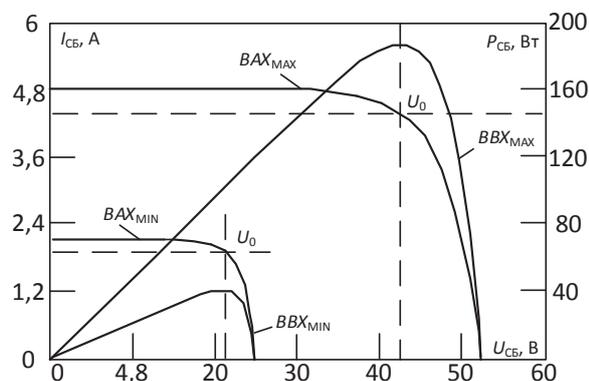


Рис. 3. ВАХ и ВВХ солнечной панели КСМ-160

Fig. 3. Characteristics of the solar panel KSM-160

Типовые схемы преобразователей энергии солнечных батарей изображены на рис. 4. Самым распространённым вариантом является понижающий преобразователь (рис. 4, а). Преимущество схемы – стабильный ток заряда аккумулятора, обеспечиваемый большой выходной индуктивностью, однако прерывистое импульсное потребление входного тока требует установки громоздкого С-фильтра [3].

Повышающий преобразователь (рис. 4, б) имеет на выходе дроссель, обеспечивающий непрерыв-

ность 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 конечного устройства (рис. 1), наиболее приемлемым вариантом является использование именно этого схемного решения. Из всех приведенных типов преобразователей самым высоким КПД обладает ППН.

Для успешного регулирования точки максимальной мощности ВАХ при любом соотношении напряжений на СБ и нагрузке также можно использовать преобразователь Кука, имеющий входной каскад на основе повышающего преобразователя, а выходной – на основе понижающего (рис. 4, в) [1].

Обзор существующих алгоритмов управления

Для оптимизации выходной мощности фотомодулей, как правило, используется один из известных алгоритмов. В некоторых устройствах для отслеживания точки максимальной мощности реализуют несколько алгоритмов (рис. 5), и переключения между ними осуществляются в зависимости от условий работы. Основными средствами алгоритмизации МРРТ являются: метод возмущения и наблюдения (рис. 5, а), методы возрастающей проводимости (рис. 5, б) и постоянного напряжения [4].

При использовании метода возмущения и наблюдения устройство на небольшую величину изменяет эквивалентное входное сопротивление преобразователя (путём варьирования скважности силового ключа или изменения задания на входные величины напряжения, тока или мощности), вследствие чего варьируется напряжение на СБ и далее производится измерение её выходных параметров. Если мощность увеличивается – контроллер продолжает изменять задающий параметр в этом же направлении, пока мощность не перестанет возрастать. Данный метод является наиболее распространённым, несмотря на то что он приводит к колебаниям мощности. Широкое применение этого метода обусловлено его простотой и может быть реализовано на основе функциональной схемы системы управления ППН, приведенной на рис. 6 [5].

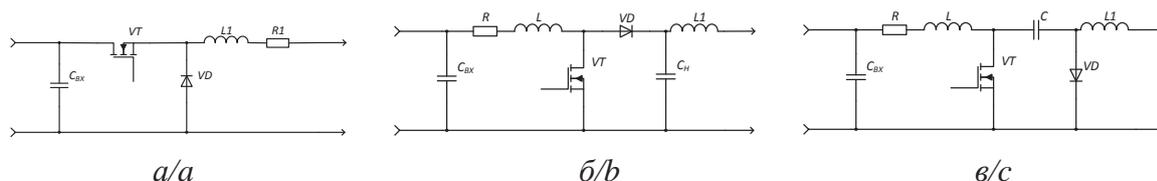


Рис. 4. Типовые схемы ПЭСБ: а) понижающий; б) повышающий; в) преобразователь Кука

Fig. 4. Typical circuits of DC-DC converters: a) buck; b) boost; c) Cuk converter

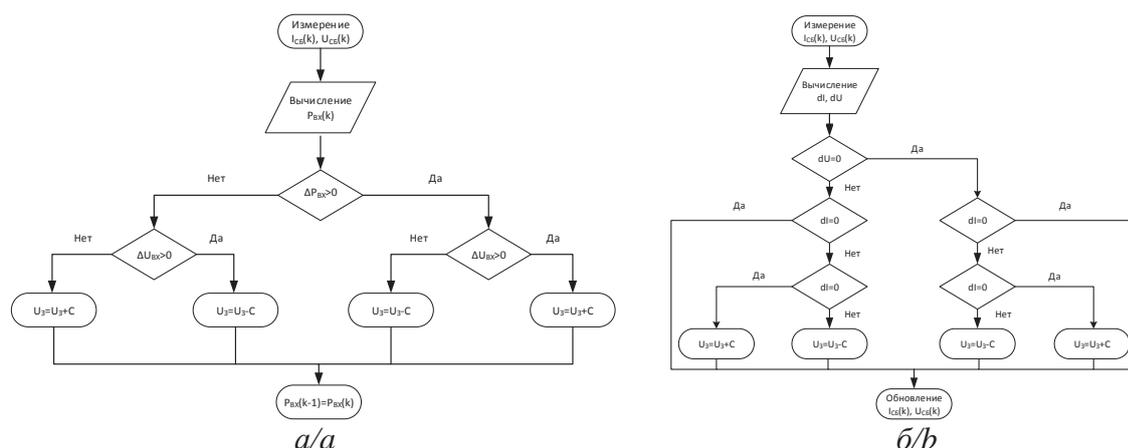


Рис. 5. Блок-схемы алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности методом: а) возмущения и наблюдения; б) возрастающей проводимости

Fig. 5. Block diagram of algorithms of MPPT by: a) perturbation and observation; b) increasing conductance

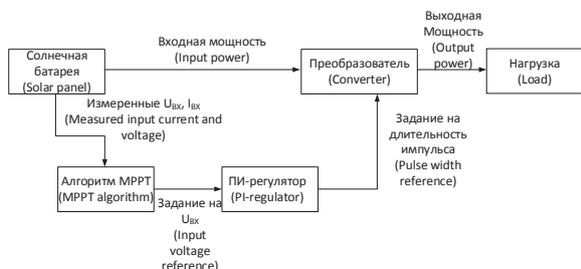


Рис. 6. Функциональная схема системы управления ППН
 Fig. 6. Chain diagram of a boost DC-DC converter control system

В методе возрастающей проводимости преобразователь фиксирует увеличение тока и напряжения СБ, чтобы предсказать эффект от изменения напряжения. Он требует увеличения вычислений микроконтроллером, но при этом отслеживает изменение окружающих условий с большей скоростью, чем предыдущий метод. Однако этот способ

так же приводит к колебаниям мощности. Рассматриваемый метод использует возрастающую проводимость dI/dU солнечной батареи для вычисления знака изменения мощности по отношению к напряжению dP/dU . При этом вычисляется точка максимальной мощности и производится сравнение возрастающей проводимости $\Delta I/\Delta U$ с проводимостью СБ (I/U). При выполнении условия $\Delta I/\Delta U = I/U$ выходное напряжение равно напряжению, соответствующему наибольшему значению мощности. Уставка ПИ-регулятора по напряжению поддерживается пока не изменится уровень освещённости, далее процесс повторяется.

Результаты моделирования

На рис. 7 представлена имитационная модель системы отслеживания точки максимальной мощности. В модели преобразователь заменён переменным сопротивлением, величина которого регулируется динамически с помощью одного из алгоритмов MPPT.

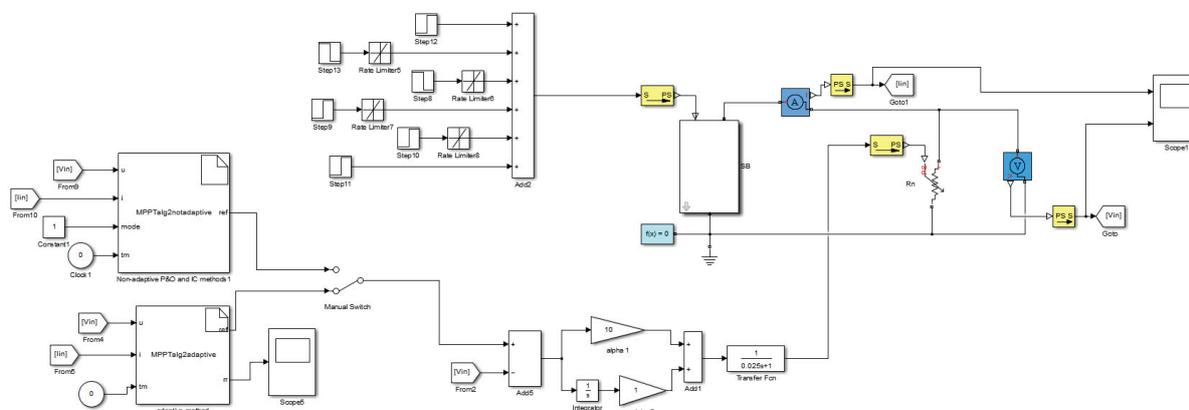


Рис. 7. Имитационная модель для отладки алгоритмов MPPT
 Fig. 7. Simulation model for adjustment of MPPT algorithms

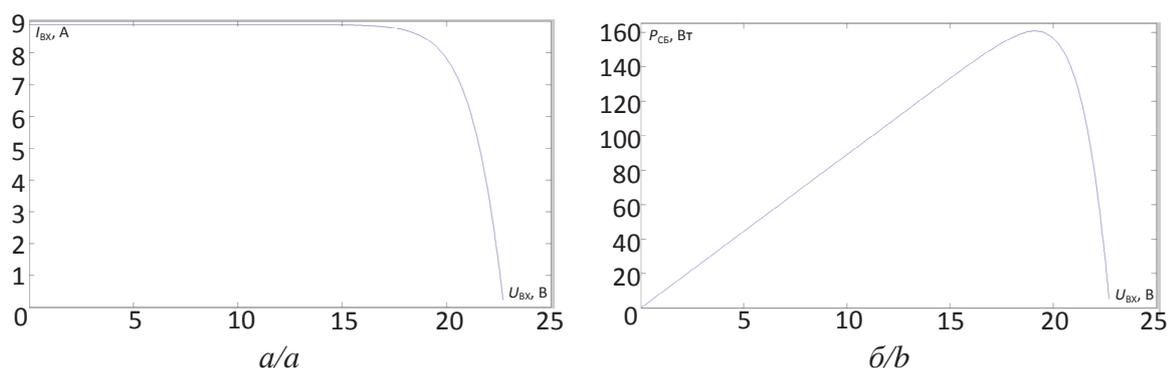


Рис. 8. Характеристики модели СБ: а) ВАХ; б) ВВХ

Fig. 8. Characteristics of solar panel: a) current voltage; b) power voltage

При построении имитационной модели приняты следующие допущения:

- не учитывается широтно-импульсная модуляция (преобразователь представлен эквивалентным сопротивлением), т. к. время квантования алгоритма отслеживания точки максимальной мощности существенно выше периода ШИМ;
- инерционность преобразователя при реагировании на изменение входного напряжения представлена апериодическим звеном.

На рис. 8 приведены ВАХ и ВВХ модели СБ, используемой при моделировании.

В результате имитационного моделирования получены графики выхода на рабочую точку и отыскания новых максимумов мощности при изменении величины освещённости фотомодуля. На рис. 9 представлены диаграммы тока (I_{BX}), напряжения (U_{BX}) и мощности солнечной батареи (P_{CB}) для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с максимальным шагом по напряжению.

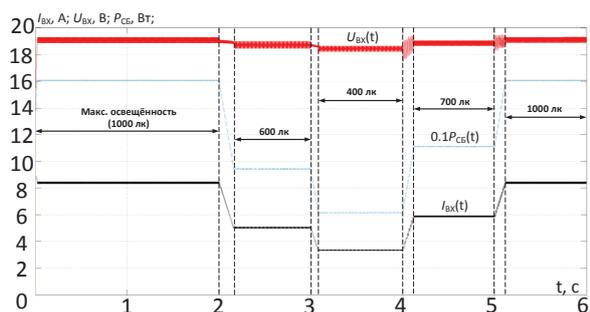


Рис. 9. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с максимальным шагом

Fig. 9. Current, voltage and power diagrams of solar panel for non-adaptive perturbation and observation method with maximum step

На рис. 10 изображены аналогичные временные диаграммы для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с минимальным шагом по напряжению.

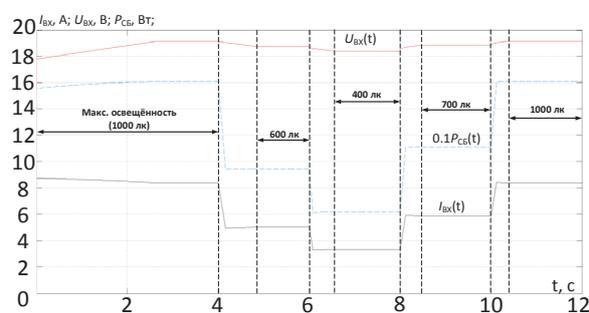


Рис. 10. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с минимальным шагом

Fig. 10. Current, voltage and power diagrams of solar panel for non-adaptive perturbation and observation method with minimum step

Адаптивный алгоритм реализован следующим образом: при последовательном движении текущей рабочей точки в одну сторону увеличивается и шаг приращения задания на входное напряжение на каждой итерации; если на предыдущем шаге мощность увеличилась, а на текущем – уменьшилась, то при этом шаг приращения уменьшается. На рис. 11 даны временные диаграммы тока, напряжения и мощности для адаптивного алгоритма возмущения и наблюдения.

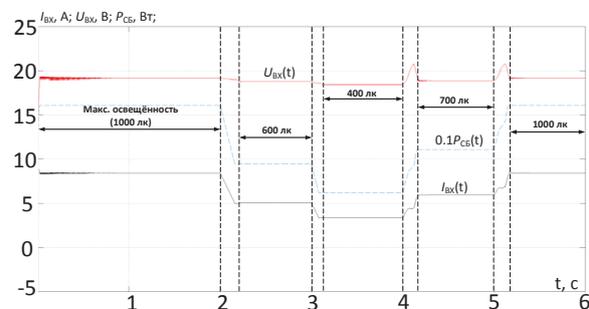


Рис. 11. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для адаптивного алгоритма возмущения и наблюдения

Fig. 11. Current, voltage and power diagrams of solar panel for adaptive perturbation and observation method

На рис. 12 приведены графики работы системы по алгоритму возрастающей проводимости.

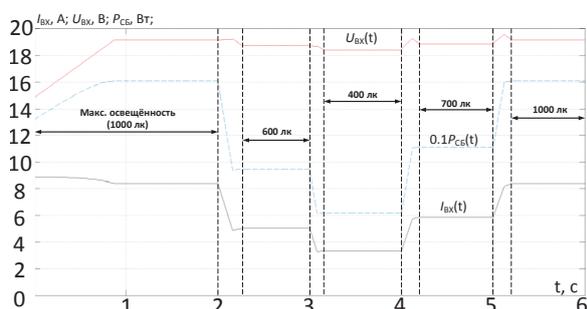


Рис. 12. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для алгоритма возрастающей проводимости

Fig. 12. Current, voltage and power diagrams of solar panel for incrementing conductance 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 обрабатывает 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.

Экспериментальные исследования

Опыты проводились с использованием звена постоянного тока инвертора солнечных батарей, представляющего собой два параллельно включенных повышающих преобразователя напряжения. Фото печатной платы данного типа преобразователя представлено на рис. 13.

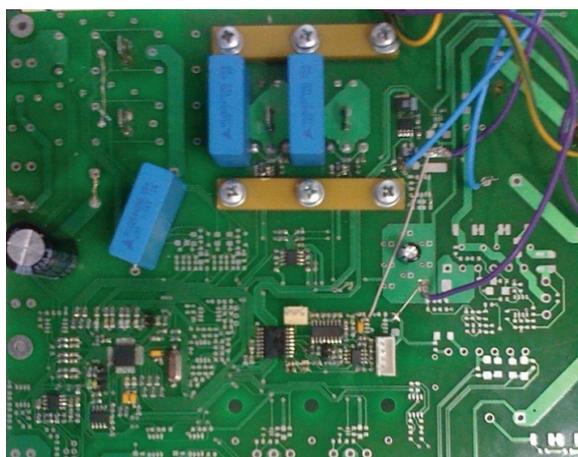


Рис. 13. Фото печатной платы ППН

Fig. 13. Photo of DC-DC boost converter print circuit board

Для получения нелинейной ВАХ использовался лабораторный источник питания GW Instek

PSP-603. Этот тип источника позволяет получить вольт-амперные характеристики, представленные на рис. 14.

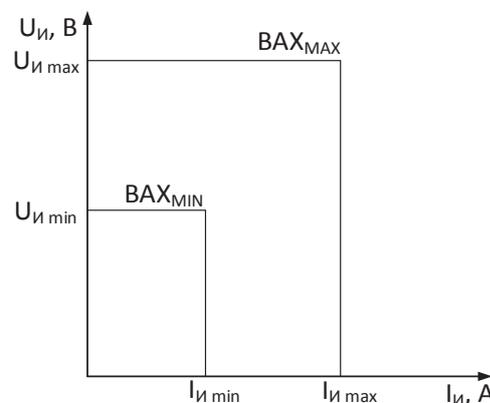


Рис. 14. ВАХ источника питания

Fig. 14. Current voltage characteristic of a power source

Для получения наиболее близких по форме ВАХ и ВВХ к соответствующим характеристикам СБ было реализовано последовательное и параллельное подключение сопротивлений между источником питания и ППН. Опытные вольт-амперные $U=f(I)$ и вольт-ваттные $P=f(I)$ характеристики изображены на рис. 15.

В табл. 1 приведены значения входных токов и напряжений, соответствующих точкам максимальной мощности для каждой вольт-амперной характеристики вышеприведенного рисунка.

Таблица 1. Входные токи и напряжения для каждой ВАХ

Table 1. Input currents and voltages for each characteristic

№ характеристики Characteristic	I_{max} , А	U_{max} , В	P_{max} , 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 рассматриваемом алгоритме возмущение реализуется через изменение задания на входное напряжение преобразователя, которое обрабатывается ПИ-регулятором. Осциллограммы обработки этого процесса приведены на рис. 16.

Частота вызова алгоритма МРРТ выбиралась исходя из динамических свойств замкнутой системы управления. Из данных осциллограмм видно, что время переходного процесса входного напряжения равняется 10 мс. В соответствии с этим частота вызова алгоритма МРРТ выбирается не выше 100 Гц [5–7].

На рис. 17 приведена осциллограмма работы алгоритма при запуске и переходе между характеристиками источника питания.

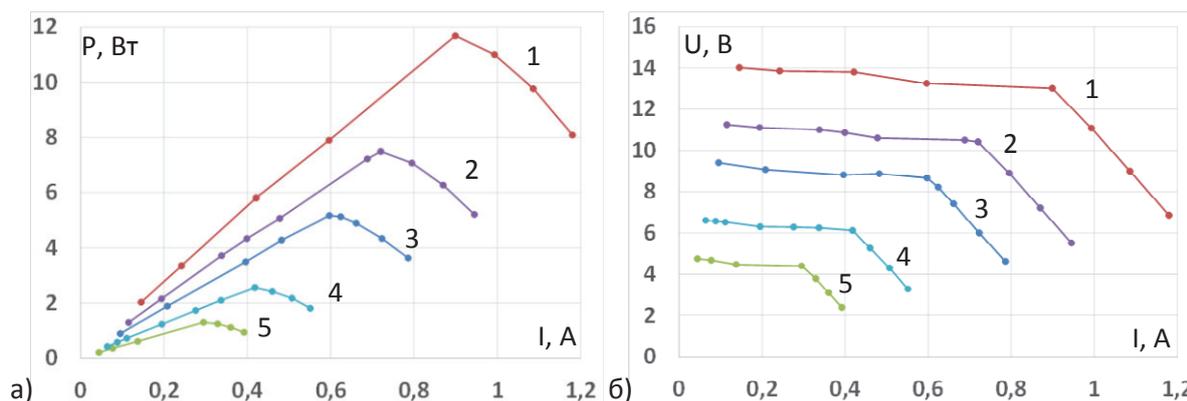


Рис. 15. Характеристики нелинейного источника питания: а) ВВХ $P=f(I)$; б) ВАХ $U=f(I)$

Fig. 15. Characteristics of non-linear power source: а) power voltage characteristic $P=f(I)$; б) current voltage characteristic $U=f(I)$

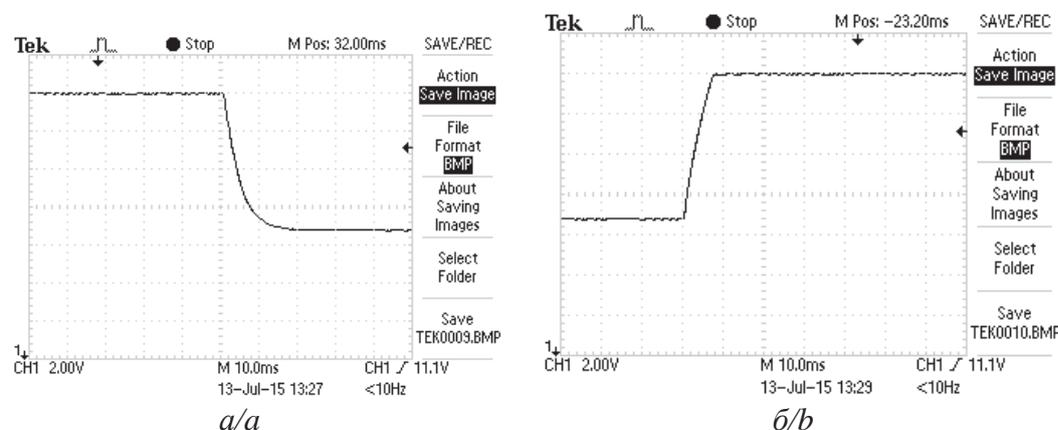


Рис. 16. Осциллограммы отработки системой задания на уменьшение (а) и увеличение (б) входного напряжения

Fig. 16. Oscillograms of operation of reference for reduction (а) and increase (б) of input voltage

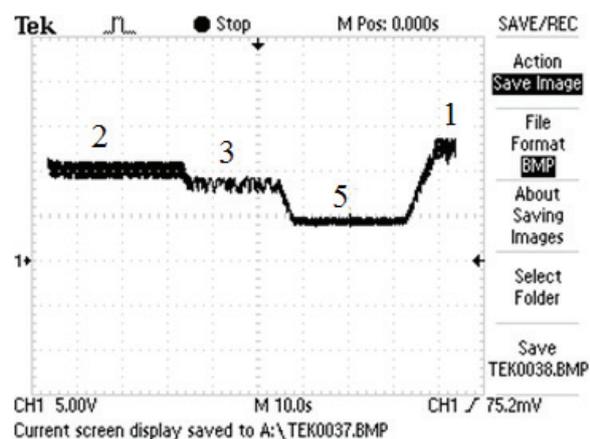


Рис. 17. Осциллограмма работы алгоритма при имитации изменения освещённости

Fig. 17. Oscillogram of algorithm functioning when simulating illumination changes

На данном рисунке цифрами обозначена работа ППН на соответствующих ВАХ (рис. 7, табл. 1).

Проведен расчёт точности нахождения точки максимальной мощности на каждой рабочей точ-

ке. Приводится пример определения мощности для характеристики 2:

$$P_{\max} = U_{\max} I_{\max} = 10,41 \cdot 0,72 = 7,49 \text{ Вт},$$

$$P'_{\max} = U' I' = 11,34 \cdot 0,64 = 7,26 \text{ Вт},$$

где I_{\max} , U_{\max} и P_{\max} – максимальные значения тока, напряжения и мощности для каждой ВАХ источника; I' , U' и P'_{\max} – установившиеся в результате работы алгоритма значения тока, напряжения и мощности на выходе источника, определённые экспериментально.

Далее вычисляется точность:

$$\frac{P'_{\max}}{P_{\max}} 100\% = \frac{7,26}{7,49} 100\% = 96,93\%.$$

Результаты расчетов для работы системы на каждой ВАХ (рис. 15) приведены в табл. 2.

Из рассмотренного видно, что потери мощности связаны в первую очередь с колебаниями задания на входное напряжение (рис. 18, а). Их можно избежать, если использовать адаптивный алгоритм изменения шага возмущения по мере приближения к отслеживаемой точке (рис. 18, б). При испытании адаптивного алгоритма точность составила 98–99% [8, 9].

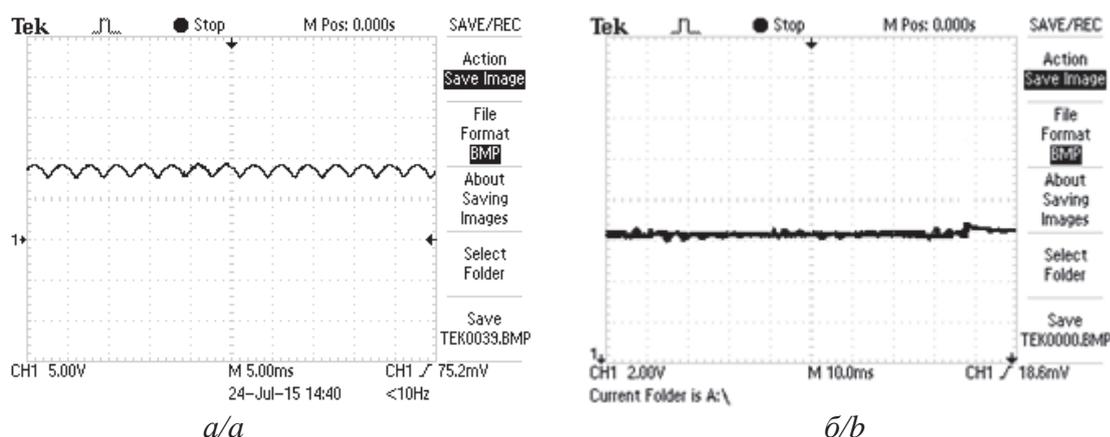


Рис. 18. Осциллограммы колебания входного напряжения источника при работе алгоритмов: а) неадаптивного; б) адаптивного
Fig. 18. Oscillogram of input voltage source pulsations for: a) non-adaptive; b) adaptive algorithm

Таблица 2. Точность нахождения точки максимальной мощности для различных уровней освещённости

Table 2. Accuracy of tracking maximum power point for different levels of illumination

Обозначение интервала Interval	Точность, % Accuracy, %
2	96,93
3	95,8
5	95,2
1	95,73

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Достигнутое значение точности нахождения точки максимальной мощности (95–96 %) при

работе неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения удовлетворяет теоретическим и экспериментальным данным отечественных и зарубежных исследователей [1, 5–20].

- Для увеличения точности (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 точности, сочетающийся с достаточным быстродействием.
6. Ting-Chung Yu, Yu-Cheng Lin. A study on maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems // Lunghwa University of Science and Technology. 2012. URL: <https://www.lhu.edu.tw/m/oa/synthetic/publish/publish/30/4.%E4%BD%99%E5%AE%9A%E4%B8%AD-A%20Study%20on%20Maximum%20Power%20Point%20Tracking%20Algorithms%20for%20Photovoltaic%20Systems.pdf> (дата обращения: 20.12.2015).
 7. Saurav Stapathy. 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: 20.12.2015).
 8. Divya Teja Reddy Challa, Raghavendar I. Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter // International Journal of modern engineering research. – 2012. – V. 2. – Iss. 6. – P. 4491–4496.
 9. Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions / Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg // Power Electronics and Motion Control Conference: 12th International Conference (EPE/PEMC 2006). – Portoroz, 2006. – V. 1. – P. 1614–1619.
 10. Samer Alsadi, Basim Alsayid. Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe al-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Характеристики фотоэлектрического модуля КСМ-160 // ОАО НПФ «Квант», 2013. URL: www.rusnanonet.ru/download/nano/file/ksm160.pdf (дата обращения: 20.12.2015).
3. 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.
4. 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. URL: <https://doaj.org/article/10517792b1d8443e9b69779fb5560a214> (дата обращения: 20.12.2015).
5. Moring S., Pols A. Maximum Power Point Tracking: Algorithm and Software Development // Delft University of Technology. 2012. URL: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Aceb32d5b-985a-4684-ab14-84888f0b1b11/> (дата обращения: 20.12.2015).

- gorithm // International journal of engineering and innovative technology. – 2012. – V. 2. – Iss. 6. – P. 80–85.
11. Implementation of PIC-based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System / Adel A. Elbaset, Ahmed Emad-El-din Hussein, Ayman Brisha, Ramadan Mahmoud Mostafa // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. – V. 4. – Iss. 5. – P. 392–401.
 12. Raju D., Ranga Rajan S. Simulation and hardware implementation of change in conductance MPPT controller for a solar photovoltaic system using Cuk converter // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2013. – V. 2. – Iss. 7. – P. 188–195.
 13. Sreekumar A.V., Arun Rajendren. MPPT of PV arrays under partial shading condition using SEPIC converter // International journal of Research in Engineering and Technology. – 2014. – V. 3. – Iss. 7. – P. 398–404.
 14. 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, Soubhagya 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: 20.12.2015).
 15. Saleh Elkelani Babaa, Armstrong M., Pickert V. 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.
 16. Wei Guo, Dong-mei-Zhao. The Maximum Power Tracking Method and Reactive Compensation Simulation Research Based on DIGSILENT // Energy and Power Engineering. – 2013. – V. 5. – Iss. 4. – P. 398–403.
 17. Mohammed El Alami, Mohamed Habibi, Seddik Bri. Modeling the Chain of Conversion for a PV System // Smart Grid and Renewable Energy. – 2014. – V. 5. – Iss. 10. – P. 239–248.
 18. Areen Abdallah Allataifeh, Khaled Batatineh, 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.
 19. Solar Energy: Trends and Enabling Technologies / V. Devabhaktuni, M. Alam, S.S.S. Reddy Depuru, II R.C. Green, D. Nims, C. Near // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – V. 19. – Iss. 3. – P. 555–556.
 20. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems / V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2006. – V. 90. – Iss. 11. – P. 1555–1578.

Поступила 29.01.2016 г.

Информация об авторах

Русскин В.А., магистрант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Семёнов С.М., старший преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Диксон Р.К., ассистент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета; специалист отдела энергетики ЮНЕСКО Карибского бассейна, Ямайка.

UDC 621.314.632:572:472.001.5

STUDY OF ALGORITHMS FOR TRACKING MAXIMUM POWER POINT FOR BOOST DC-DC CONVERTER OF SOLAR INVERTER

Viktor A. Russkin¹,
vrsskn@gmail.com

Sergey M. Semenov¹,
ssm@tpu.ru

Robert C. Dixon^{1,2},
robert_dixon@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 640034, Russia

² Energy Division Specialist of UNESCO Caribbean, Jamaica.

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. Nowadays the increasing attention is paid to alternative energy sources such as solar power. This is caused by increase in price for non-renewable energy sources. However, generation of solar energy has a number of problems related to the cost of photovoltaic panels, their utilization and imperfections of devices of energy conversion of these systems. All these issues demand the development of power supplies on modern element base and their control systems which allow reaching high rates of energy efficiency. To achieve these aims the authors have used the known methods of tracking maximum power point.

The main aim of the study is to research various maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems; to develop the system with the best efficiency and high-speed performance and physical model of the final device and to estimate its efficiency.

The methods used in the study: 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 includes: setup of PI-regulator, imitation of various levels of blackout of a solar battery, assessment of efficiency of the converter.

The results. The authors developed the simulation models for adaptive and non-adaptive perturbation and the 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:

Maximum power point tracking, perturbation and observation method, incrementing conductance method, boost DC-DC converter, energy converter of solar batteries.

REFERENCES

- Osipov A.V., Shurigin Yu.A., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M. Comparative analysis of effectiveness of solar battery energy transformation by DC-DC converters. *Proceedings of Tomsk State University of Control systems and Radioelectronics*, 2013, vol. 27, Iss. 3, pp. 14–19. In Rus.
- 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 2015).
- 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.
- 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 2015).
- Moring S., Pols A. Maximum Power Point Tracking: Algorithm and Software Development. *Delft University of Technology*. 2012. Available at: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Aceb32d5b-985a-4684-ab14-84888f0b1b11/> (accessed 20 December 2015).
- Ting-Chung Yu, Yu-Cheng Lin. A study on maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems. *Lunghwa University of Science and Technology*. 2012. Available at: <https://www.lhu.edu.tw/m/oa/synthetic/publish/publish/30/4.%E4%BD%99%E5%AE%9A%E4%B8%AD-A%20Study%20on%20Maximum%20Power%20Point%20Tracking%20Algorithms%20for%20Photovoltaic%20Systems.pdf> (accessed 20 December 2015).
- 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 2015).
- Divya Teja Reddy Challa, Raghavendar I. Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter. *International Journal of modern engineering research*, 2012, vol. 2, Iss. 6, pp. 4491–4496.
- Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions. *Power Electronics and Motion Control Conference*.

- 12th International Conference (EPE/PEMC 2006). Portoroz, 2006. Vol. 1, pp. 1614–1619.
10. Samer Alsadi, Basim Alsayid. Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm. *International journal of engineering and innovative technology*, 2012, vol. 2, Iss. 6, pp. 80–85.
 11. Adel A. Elbaset, Ahmed Emad-Eldin Hussein, Ayman Brisha, Ramadan Mahmoud Mostafa. Implementation of PIC-based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, vol. 4, Iss. 5, pp. 392–401.
 12. Raju D., S. Ranga Rajan. Simulation and hardware implementation of change in conductance MPPT controller for a solar photovoltaic system using Cuk converter. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, Iss. 7, pp. 188–195.
 13. Sreekumar A.V., Arun Rajendren. MPPT of PV arrays under partial shading condition using SEPIC converter. *International journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 3, Iss. 7, pp. 398–404.
 14. Deepak Verma, S. Nema, A.M. Shandilya, Soubhagya K. Dash. 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 20 December 2015).
 15. Saleh Elkelani Babaa, Armstrong M., Pickert V. 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.
 16. Wei Guo, Dong-mei-Zhao. The Maximum Power Tracking Method and Reactive Compensation Simulation Research Based on DIGSI-LENT. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, Iss. 4, pp. 398–403.
 17. Mohammed El Alami, Mohamed Habibi, Seddik Bri. Modeling the Chain of Conversion for a PV System. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2014, vol. 5, Iss. 10, pp. 239–248.
 18. 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.
 19. 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.
 20. Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, vol. 90, Iss. 11, pp. 1555–1578.

Received: 29 January 2016.

Information about the authors

Viktor A. Russkin, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Robert C. Dixon, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University; Energy Division Specialist, UNESCO Caribbean.