



**АВТОНОМНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА
С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ШАГОВЫМ РЕГУЛЯТОРОМ
МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, А.В. Осипов, М.М. Черная

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050 Томск, пр. Ленина, д. 40
Тел.: 8(3822) 900-162, e-mail: ottoai@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 06.06.15 Заключение совета экспертов: 09.06.15 Принято к публикации: 12.06.15

Описана научно-исследовательская автономная энергетическая установка с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей. Показано, что экстремальный шаговый регулятор, входящий в состав контроллера заряда аккумуляторной батареи, позволяет производить отбор мощности солнечной батареи свыше 98% от максимального значения при пошаговом изменении напряжения солнечной батареи, не превышающем 2 В. Система автоматического слежения солнечных батарей за Солнцем потребляет не более 1% от суточного значения выработанной энергии.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, фотоэлектрические преобразователи, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, автономная система электроснабжения, экстремальное регулирование мощности, оптимизация структуры.

**OPTIMIZING PEAK-HOLDING CONTROLLER SOLAR BATTERY
AUTONOMOUS ENERGY INSTALLATION**

Yu.A. Shinyakov, A.I. Otto, A.V. Osipov, M.M. Chernaya

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics
40 Lenin str., Tomsk, 634050, Russia
Tel.: 8(3822) 900-162, e-mail: ottoai@mail.ru

Referred: 06.06.15 Expertise: 09.06.15 Accepted: 12.06.15

There is research autonomic power plant with extreme regulation of power solar panels. It is shown that the extreme jog lever, which is part of the controller battery charge, allows the selection of solar battery power more than 98% of the maximum value at step changes in the voltage of the solar battery does not exceed 2 V. The system of the automatic solar tracking the sun uses less than 1% of the daily value of energy produced.

Keywords: energy efficiency, photovoltaic cells, solar panel, battery, autonomous power supply system, extreme power control, optimization of the structure.



Юрий Александрович
Шиняков
Yurii A. Shinyakov

Сведения об авторе: директор НИИ космических технологий ТУСУР.
Образование: Национальный исследовательский Томский политехнический университет (1972).

Область научных интересов: автономные энергетические комплексы, экстремальное регулирование мощности, силовая электроника, системы электропитания космических аппаратов.

Публикации: 53, из них 32 – ВАК.

Information about the author: Director of the Scientific Research Institute of Space Technology of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics.

Education: Tomsk Polytechnic University (1972).

Research area: autonomous power complexes, extreme power control, power electronics, power supply systems of space crafts, mathematic simulation and simulation modeling.

Publications: 53.



Артур Исаакович
Отто
Artur I. Otto

Сведения об авторе: младший научный сотрудник НИИ космических технологий ТУСУР.

Образование: Томский гос. университет систем управления и радиоэлектроники (2012).

Область автономные энергетические комплексы, экстремальное регулирование мощности, силовая электроника, системы электропитания космических аппаратов.

Публикации: 8, из них 3 – ВАК.

Information about the author: Junior researcher of the Scientific Research Institute of Space Technology of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics.

Education: Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics (2012).

Research area: autonomous power complexes, extreme power control, power electronics, power supply systems of space crafts, mathematic simulation and simulation modeling.

Publications: 8.



Александр
Владимирович
Осипов
Alexander V. Osipov

Сведения об авторе: старший научный сотрудник НИИ космических технологий ТУСУР.

Образование: Томский гос. университет систем управления и радиоэлектроники (1999).

Область научных интересов: силовая электроника, системы электропитания космических аппаратов, математическое моделирование, компьютерное моделирование.

Публикации: 49, из них 27 – ВАК.

Information about the author: Senior researcher of the Scientific Research Institute of Space Technology of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics.

Education: Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics (1999).

Research area: power electronics, power supply systems of space crafts, mathematic simulation and simulation modeling.

Publications: 49.



Мария Михайловна
Черная
Mariya M. Chernaya

Сведения об авторе: младший научный сотрудник НИИ космических технологий ТУСУР.

Образование: Томский гос. университет систем управления и радиоэлектроники (2012).

Область научных интересов: силовая электроника, системы электропитания космических аппаратов, математическое моделирование, компьютерное моделирование.

Публикации: 9, из них 3 – ВАК.

Information about the author: Junior researcher of the Scientific Research Institute of Space Technology of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics.

Education: Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics (2012).

Research area: power electronics, power supply systems of space crafts, mathematic simulation and simulation modeling.

Publications: 9.



Наиболее действенным способом повышения энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок является реализация режима непрерывного регулирования мощности солнечной батареи (СБ) в оптимальной рабочей точке, который предполагает введение в состав аппаратуры экстремального регулятора (ЭР), действие которого должно быть направлено на поиск оптимального напряжения СБ и подачу на энергопреобразующее устройство (ЭПУ) такого задающего воздействия, при котором напряжение СБ регулируется на уровне, близком к экстремальному значению [1]. Чаще всего для поиска экстремума применяются шаговый метод и метод производной, относящиеся к методам «восхождения». При этом наиболее оптимальным (простым, рациональным) способом является шаговый метод поиска экстремума мощности СБ, так как метод производной при быстро изменяющихся атмосферных условиях может работать хаотично, что приводит к затратам аппаратных ресурсов и вследствие этого к потере мощности, получаемой от СБ. Также шаговый метод уменьшает время вычислений из-за более простого алгоритма, что приводит к увеличению частоты дискретизации [2, 3].

Согласование экстремального шагового регулятора (ЭШР) с энергопреобразующим устройством, осуществляющим передачу энергии от СБ в аккумуляторную батарею и нагрузку, реализуется достаточно просто путем дискретной перестройки цепи обратной связи в канале стабилизации напряжения СБ [1].

Наиболее распространенная структурно-функциональная схема автономных фотоэлектрических энергетических установок с реализацией режима экстремального регулирования мощности СБ приведена на рис. 1, где обозначено: СБ – солнечная батарея; АБ – аккумуляторная батарея; И – инвертор; ДН1 и ДН2 – датчики напряжения; ДТ – датчик тока; ЭПУ – энергопреобразующее устройство; ЭШР – экстремальный шаговый регулятор.



Рис. 1. Структурно-функциональная схема энергетической установки с ЭШР

Fig. 1. Structural and functional diagram of a power plant with extreme step control

По приведенной схеме (рис. 1) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники разработана, изготовлена и испытана научно-исследовательская автономная фотоэлектрическая энергетическая установка АФЭУ-0,5,

состоящая из электромеханической части; контроллера заряда АБ с экстремальным шаговым регулятором мощности СБ; двух СБ – КСМ-160; двух АБ – TUDORT12V155FT; контроллера наведения фотоэлектрических панелей на Солнце на базе микроконтроллера Atmega16; драйверов управления шаговыми двигателями (DM356M); инвертора TS 1500-224.

Фотография электромеханической части энергетической установки приведена на рис. 2. Установка состоит из рамы с двумя фотоэлектрическими модулями КСМ-160; подвижного металлического каркаса; неподвижного металлического каркаса; редуктора поворота по углу места; редуктора поворота по азимуту; двух шаговых двигателей типа ШД-5Д; двух датчиков положения Солнца.



Рис. 2. Электромеханическая часть энергетической установки АФЭУ-0,5 с двумя фотоэлектрическими панелями КСМ-160
Fig. 2. Electromechanical part of the power plant with two photovoltaic panels

Неподвижный каркас установки состоит из стальной сварной рамы, состоящей из профильных трубчатых элементов с четырьмя угловыми опорами и одной центральной опоры, в которой установлен вращающийся вал. Вращение вала обеспечивается за счет шагового двигателя через червячный редуктор и цилиндрическую зубчатую передачу. Подвижный каркас установки состоит из стальной сварной рамы с закрепленной на ней ведомой шестерней, которая связана с центральным валом нижнего опорного узла шпоночным соединением для обеспечения вращения установки вокруг вертикальной оси. На этом же каркасе закреплены две дуги, на которых установлена ось вращения рамы, которая через муфту и редуктор соединена с шаговым двигателем, обеспечивающим поворот рамы по углу места. В качестве силовых механизмов, обеспечивающих поворот фотоэлектрической установки, используются червячные редукторы, которые позволяют исключить самопроизвольное изменение положения установки под действием ветровой нагрузки. Затраты на слежение установки за Солнцем – не более 1% от суточного значения выработанной энергии.

При проектировании автономных фотоэлектрических энергетических установок с ЭШР с целью прогнозирования их энергетической эффективности необходимо знать зависимость точности регулирования экстремума от шагового изменения напряжения стабилизации СБ ($\Delta U_{ст}$).

В связи с существенной сложностью выражения, описывающего вольт-амперную характеристику (ВАХ) реальной СБ, при определении и расчете характеристик системы экстремального регулирования целесообразно воспользоваться достаточно простой математической моделью СБ, где ВАХ задана тремя характерными точками: напряжением холостого хода U_{xx} , током короткого замыкания $I_{кз}$, оптимальными значениями тока $I_{опт}$ и напряжения $U_{опт}$ [4]. Уравнение ВАХ СБ при заданной температуре и освещенности имеет вид

$$I = I_{кз} \left[1 - \left(1 - I_{опт} / I_{кз} \right) \frac{U - U_{xx}}{U_{опт} - U_{xx}} \right]$$

Вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики (ВВХ) фотоэлектрических панелей КСМ-160 при разных значениях температуры и освещенности, измеренные в разное время года и построенные с помощью данной формулы, приведены на рис. 3. Из их анализа следует, что значение генерируемой мощности существенно зависит от места расположения солнечной батареи и условий ее эксплуатации, реальные практические значения $U_{опт}$ находятся в пределах 22-44 В. Диапазон изменения $U_{опт}$ панелей КСМ-160, приведенный в технических характеристиках производителя СБ (ОАО «НПП «Квант» г. Москва), 22-35 В, отличается от экспериментально измеренных значений. Это объясняется тем, что производитель фотоэлектрических панелей приводит технические характеристики при температуре модуля 25 °С.

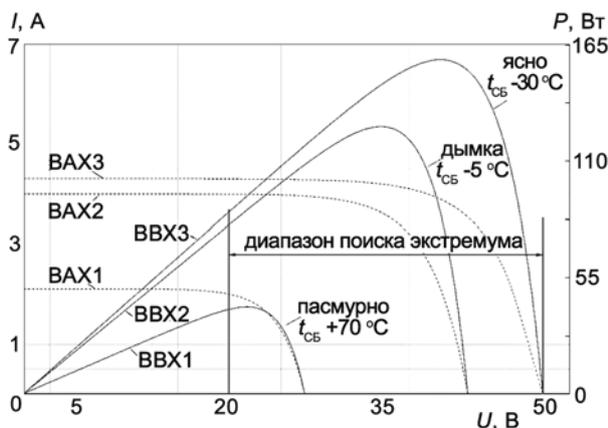


Рис. 3. Семейство вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик фотоэлектрических панелей КСМ-160 при различной температуре и степени освещенности
 Fig. 3. Current-voltage and current-watt characteristics of photovoltaic panels at different temperatures and light levels

Температура фотоэлектрических панелей существенно зависит от конструкции, интенсивности охлаждения потоками ветра и уровня освещенности и даже зимой на открытых площадках при слабом ветре превышает температуру воздуха на 10-20 градусов. Летом, в закрытых от ветра местах, перегрев панелей солнечной батареи может достигать 30-40 °С. Таким образом, из анализа ВАХ и ВВХ солнечных батарей следует, что при проектировании энергетических установок с ЭШР необходимо принимать рабочий температурный диапазон фотоэлектрических модулей от -30 до +70 °С, что ведет к изменению $U_{опт}$ и U_{xx} стандартных фотоэлектрических панелей, например КСМ-160, на 25 В. Следовательно, рабочий диапазон поиска экстремума мощности должен быть не менее 30 В (20-50 В) (рис. 3).

Значение энергетической эффективности использования СБ по мощности от значения шагового изменения
 Energy efficiency power SB step change from the value

Параметр	Значение			
$\Delta U_{ст}, В$	0,5	1	1,5	2
$P_{СБ} / P_{макс.СБ}, \%$	99,6	99,5	99	98,1

Зависимость энергетической эффективности использования СБ по мощности $P_{СБ} / P_{макс.СБ}$ от значения шагового изменения $U_{СБ}$ ($\Delta U_{ст}$) для СБ, ВВХ которых представлены на рис. 3, приведены в таблице и на рис. 4, где $P_{нд}$ – недоиспользованная мощность СБ. Из анализа значений энергетической эффективности использования СБ по мощности следует, что при пошаговом изменении $U_{СБ}$, не превышающем 2 В, гарантируется отбор максимальной мощности от СБ с точностью не менее 98% ($P_{СБ} < 2\% P_{макс.СБ}$).

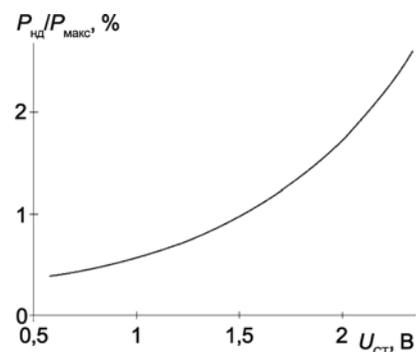


Рис. 4. Зависимость энергетической эффективности использования СБ по мощности от значения шагового изменения
 Fig. 4. Energy efficiency power SB step change from the value



В системе автоматической оптимизации шагового типа при неизменных условиях эксплуатации теоретически возможное минимальное количество шагов два или три. Двухшаговый режим поиска экстремума мощности осуществляется, когда рабочая точка на ВВХ при очередном шаговом изменении U_{CB} попадает в область оптимального значения мощности СБ (рис. 5) и при каждом втором шаговом изменении U_{CB} происходит уменьшение мощности, генерируемой СБ. Трехшаговый режим теоретически возможен в аналоговых системах измерения мощности СБ и наличии гистерезиса в системе сравнения мощности при каждом шаговом изменении U_{CB} (ΔU_{CT}). В системе автоматической оптимизации шагового типа с цифровыми системами измерения мощности СБ трехшаговый режим практически невозможен.

Характеристики СБ (ВАХ, ВВХ) автономных энергетических установок изменяются при изменении условий эксплуатации. При затенении фотоэлектрических панелей облаками изменяется освещенность. Время наступления затенения, как правило, составляет 5-10 секунд, однако при этом преимущественно изменяется уровень генерируемой мощности, но практически не успевает измениться температура панелей, поэтому каких-либо затруднений регулирования экстремума мощности не происходит. При большой скорости изменения освещенности теоретически система может перейти в одношаговый режим, т.е. направление поиска экстремума мощности изменится после каждого шага. Схематически процесс регулирования в этом случае показан на рис. 6. Измерение мощности экстремальным регулятором производится в точках 2' и 3'. В результате при медленном изменении освещенности сохраняется двухшаговый режим (рис. 5).

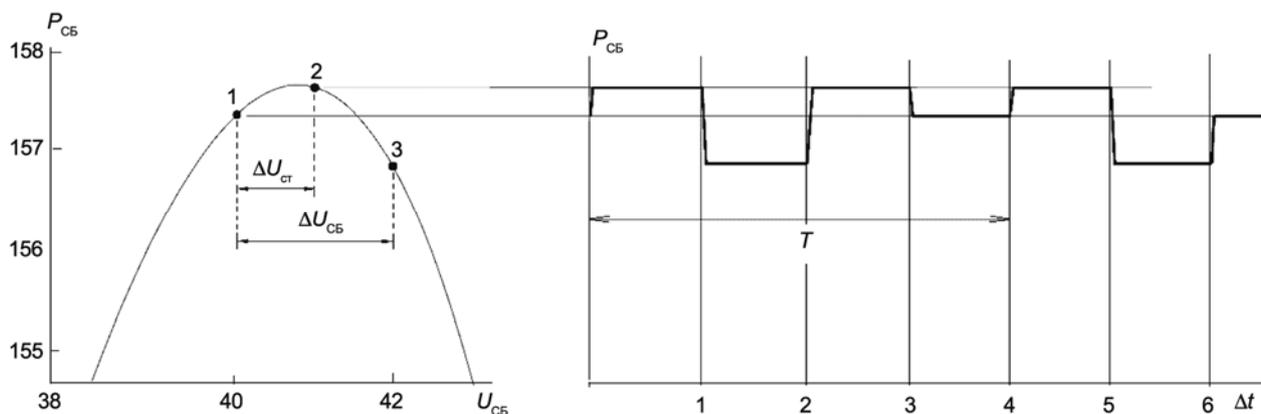


Рис. 5. Диаграмма двухшагового режима поиска экстремума мощности СБ
Fig. 5. Chart two-step search mode power extremum SB

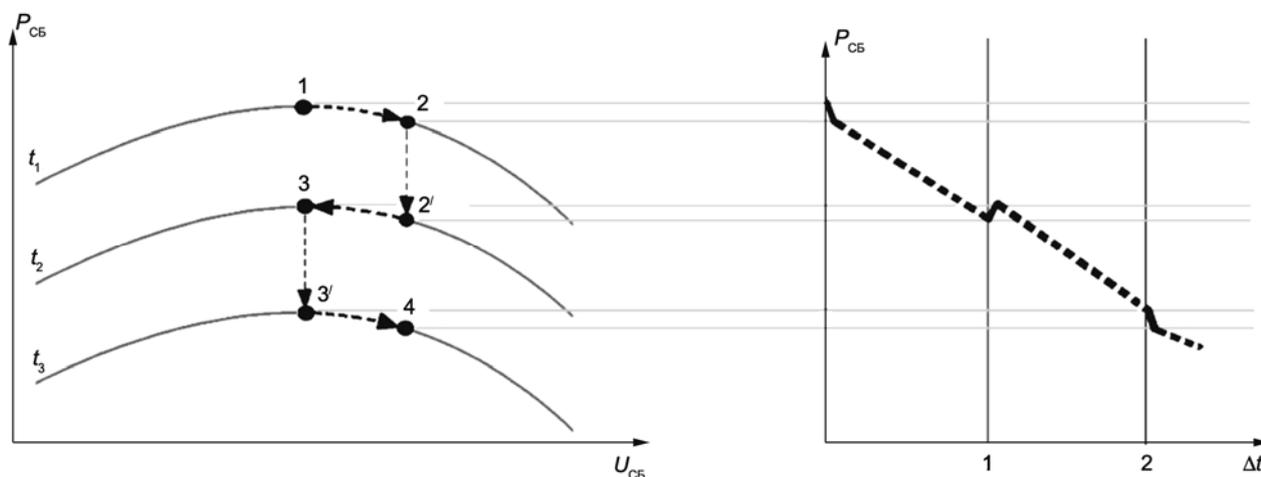


Рис. 6. Диаграммы регулирования экстремума мощности СБ при затенении фотоэлектрических панелей облаками
Fig. 6. Charts regulation extremum power SB in shading of photovoltaic panels clouds



Экспериментально установлено (рис. 7), что охлаждение фотоэлектрических панелей после их плотного затенения облаками до температуры окружающего воздуха происходит за 10-12 минут. При появлении Солнца температура фотоэлектрических панелей может максимально повыситься на 40 °С также за 10-12 минут, т.е. максимальное значение скорости дрейфа ВВХ ($V_{UСБ}$) может составлять $\approx 0,03$ В/с.

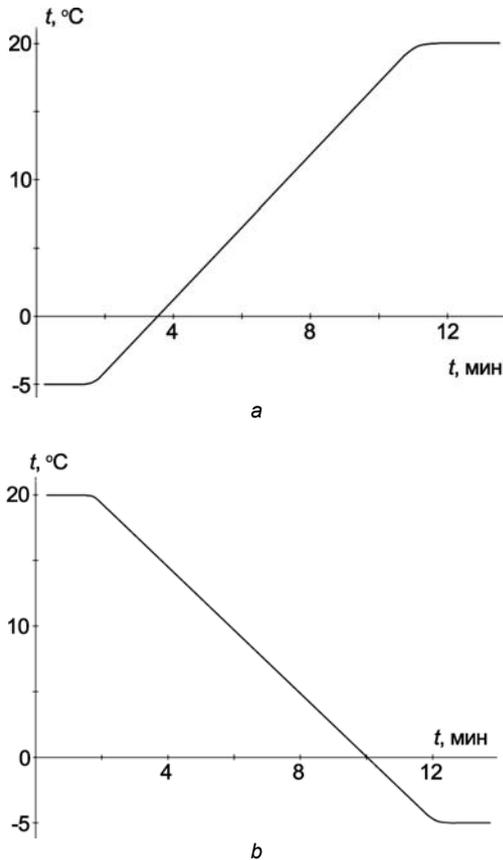


Рис. 7. Зависимость изменения температуры СБ от времени при нагреве (а) и охлаждении (b) фотоэлектрической панели

Fig. 7. The dependence of the temperature change SB time during heating (a) and cooling (b) photovoltaic panels

В разработанном контроллере применена схема зарядного устройства на основе понижающего преобразователя напряжения, в которой использован силовой полевой транзистор IRFPS3810, имеющий низкое сопротивление канала. Схема управления зарядным устройством реализована на базе микроконтроллера Atmega128, совмещающего функции пользовательского интерфейса с формированием управляющего воздействия на силовой транзистор.

Система управления производит регулирование напряжения в оптимальной точке по шаговому методу поиска экстремума, алгоритм которого приведен на рис. 8.

В данном методе экстремальный регулятор рассчитывает выходную мощность СБ. Полученное измеренное значение входной мощности $P(n)$ сравнивается со значением мощности $P(n-1)$, измеренным до введения управляющего воздействия, и согласно алгоритму принимается решение о направлении перемещения рабочей точки по вольт-ваттной характеристике. Если $P(n) - P(n-1) > 0$, направление шага не изменяется. Если же происходит уменьшение мощности $P(n) - P(n-1) < 0$, то знак шага ЭШР меняется на противоположный.

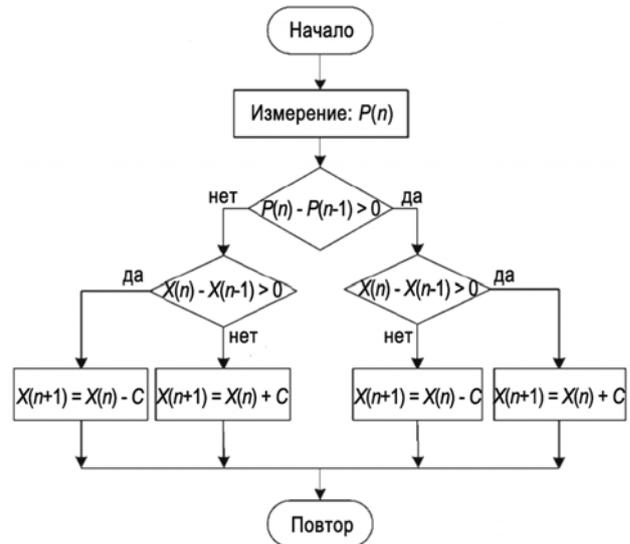


Рис. 8. Алгоритм шагового регулирования точки максимальной мощности СБ

Fig. 8. Stepper control algorithm of maximum power point SB

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований контроллера заряда АБ с шаговым экстремальным регулятором мощности СБ, входящим в состав автономной энергетической установки со стандартными фотоэлектрическими панелями с номинальным напряжением 35 В (при температуре 25 °С), определен диапазон поиска экстремума мощности в зависимости от температуры и освещенности СБ, равный 30 В. При использовании цифровой системы управления и шаге экстремального регулятора от 0,5 до 2 В энергетическая эффективность устройства составляет более 98% от максимально возможной мощности СБ. При изменяющейся ВАХ во время нестабильных внешних условий система показывает стабильную и эффективную работу, осуществляя поиск экстремума в двухшаговом и одношаговом режимах.

Список литературы

1. Шниязов Ю.А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов // Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. С.П. Королева. 2007. Вып. 1 (12). С. 51-57.
2. Ali Reza Reisi, Mohammad Hassan Moradi, Shahriar Jamasb. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system // Renewable and Sustainable Energy Review. 2013. Vol. 19. P. 433–443.
3. Bahgat A.B.G, Helwab N.H., Ahmadb G.E., El Shenawyb E.T. Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks // Renewable Energy. 2005. Vol. 30. P. 1257–1268.
4. Привалов В.Д., Никифоров В.Е. Оценка эффективности применения экстремального регулятора в автономных СЭП. Куйбышев: КПИ, 1981.

References

1. Šinâkov Ū.A. Èkstreml'noe regulirovanie mošnosti solnečnyh batarej avtomatičeskih kosmičeskih apparatov // Vestnik Samarskogo gos. aèrokosmičeskogo un-ta im. akad. S.P. Koroleva. 2007. Vyp. 1 (12). S. 51-57.
2. Ali Reza Reisi, Mohammad Hassan Moradi, Shahriar Jamasb. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system // Renewable and Sustainable Energy Review. 2013. Vol. 19. P. 433–443.
3. Bahgat A.B.G, Helwab N.H., Ahmadb G.E., El Shenawyb E.T. Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks // Renewable Energy. 2005. Vol. 30. P. 1257–1268.
4. Privalov V.D., Nikiforov V.E. Ocenka èffektivnosti primeneniâ èkstreml'nogo regulâtorâ v avtonomnyh SÈP. Kujbyšev: KPI, 1981.

Транслитерация по ISO 9:1995

