

УДК 621.31

Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, А.В. Осипов,  
О.А. Теуцаков, К.В. Аржанов

## Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью

Приведены результаты эскизного проектирования автономной фотоэлектрической энергетической установки с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей и автоматическим слежением фотоэлектрических панелей за солнцем выходной мощностью 0,5 кВт.

**Ключевые слова:** автоматизированная фотоэлектрическая энергетическая установка, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, энергетическая эффективность, экстремальное регулирование мощности солнечных батарей, автоматическое слежение фотоэлектрических панелей за солнцем.

Совершенствование автономных фотоэлектрических энергетических установок (АФЭУ) прежде всего зависит от улучшения технических характеристик источников тока – солнечных и аккумуляторных батарей (СБ, АБ). Однако даже при самых совершенных источниках энергии энергетическая установка в целом может обладать неудовлетворительными энергетическими характеристиками из-за нерационального использования их возможностей. Поэтому при проектировании современных эффективных автономных фотоэлектрических энергетических установок должна решаться задача как разработки (использования) фотопреобразователей с повышенным КПД и аккумуляторных батарей с улучшенными техническими характеристиками, так и задача системного проектирования фотоэлектрических систем и энергетических установок с целью повышения их энергетической эффективности.

Эффективность использования источников энергии при их длительном функционировании, в большой мере зависит от выбранной структурной схемы, конструкции и принятых способов управления источниками энергии [1]. В настоящее время широкое применение находят структурные схемы энергетических систем и установок без реализации режима экстремального регулирования ее мощности [2]. В таких автономных фотоэлектрических энергетических установках преимущественно используются простые контроллеры тока заряда и разряда АБ, которые просто отключают источник энергии (СБ) при достижении напряжения на АБ предельного значения. При снижении напряжения на АБ до некоторого значения снова подключается солнечная батарея, и заряд возобновляется. Напряжение на СБ определяется напряжением на АБ в конкретный момент времени и зависит от степени заряженности АБ. Так как экстремальное регулирование мощности (ЭРМ) не реализуется, то коэффициент энергетической эффективности установок низкий.

Повысить коэффициент энергетической эффективности не менее чем на 30–50% возможно следующими основными способами [3]:

- реализацией режима отбора мощности в оптимальной рабочей точке вольт-амперной характеристики солнечной батареи в течение всего срока эксплуатации (реализацией режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей);
- реализацией режима непрерывного автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем;
- оптимизацией конструкции солнечной батареи с целью достижения минимального нагрева фотоэлементов.

Эффект от реализации режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей зависит от диапазона изменения рабочей температуры фотоэлектрических панелей. Солнечные батареи автономных энергетических установок используются при значительно изменяющихся условиях эксплуатации. Они сильно подвержены влиянию окружающей среды. Их вольт-амперные характеристики (ВАХ) отличаются нелинейностью и нестабильностью. Вольт-ваттные характеристики (ВВХ) имеют ярко выраженный максимум генерируемой мощности, положение которого существенно изменяется от условий эксплуатации (ресурса, температуры, освещенности). При изменении

рабочей температуры от +70 до –30 °С напряжение оптимальной рабочей точки кремниевой солнечной батареи увеличивается ориентировочно в 1,5 раза (напряжение фотоэлемента изменяется в диапазоне 0,5–0,75 В) [3]. Ток солнечной батареи незначительно зависит от температуры.

Теоретический анализ показывает, что в сравнении с системами с параллельным соединением СБ и АБ (рабочее напряжение СБ равно напряжению АБ) энергетическая эффективность реализации режима экстремального регулирования мощности СБ при глубоко разряженной АБ может достигать 50% [3].

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности экстремального регулирования мощности СБ по сравнению с параллельным соединением СБ и АБ. Реализация режима ЭРМ, как и реализация автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем, является наиболее действенным способом повышения энергетической эффективности фотоэлектрических энергетических установок.

Эффект от реализации режима непрерывного автоматического слежения фотоэлектрических панелей за Солнцем также значителен. Из проведенного предварительного анализа энергетической эффективности систем автоматического слежения за Солнцем следует, что эффективность для Томска и Томской области относительно горизонтального расположения фотоэлектрических панелей составляет:

- при выставлении солнечной батареи под углом, равным широте местоположения, – 20%;
- при применении одноосевой системы слежения за Солнцем – 42%;
- при применении двухосевой системы слежения за Солнцем – 51%.

В среднем для различных мест расположения автономных фотоэлектрических энергетических установок (Иркутск, Ташкент, Санкт-Петербург, Якутск, Томск) повышение энергетической эффективности за счет применения систем слежения за Солнцем повышается на 31% для одноосевых систем и на 46% – для двухосевых [3].

Целесообразность оптимизации конструкции солнечной батареи с целью повышения коэффициента энергетической эффективности объясняется высокой чувствительностью фотоэлементов к температуре. С повышением температуры эффективность работы солнечных батарей, как и большинства других полупроводниковых приборов, снижается. Поэтому необходимо принимать все меры для снижения нагрева, неизбежного под палящими прямыми солнечными лучами. Дополнительно осложняет ситуацию то, что чувствительная поверхность довольно хрупких фотоэлементов закрывается защитным стеклом или прозрачным пластиком. В результате образуется своеобразный «парник», усугубляющий перегрев.

Практически отсутствует информация о работах по исследованию эффективности конкретных мер и устройств принудительного охлаждения фотоэлектрических панелей солнечных батарей.

Творческим коллективом Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по государственным контрактам в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы ведется разработка автономной энергетической установки с системой экстремального регулирования мощности (ЭРМ) солнечных батарей (точность регулирования экстремума мощности солнечной батареи должна быть не ниже 98%) и непрерывным автоматическим слежением фотоэлектрических панелей за Солнцем (диапазон регулирования солнечного вектора по горизонтали должен быть не менее 180°, а по вертикали – 70°). То есть ведется работа по исследованию и решению двух выше-названных задач повышения энергетической эффективности фотоэлектрических систем и установок.

Принципиальным отличием проектируемой фотоэлектрической энергетической установки является одновременное использование шагового способа управления при автоматическом наведении фотоэлектрических панелей на Солнце и экстремального регулирования мощности СБ и формирование единой системы управления энергетической установкой путем разделения ее периода функционирования на временные отрезки поочередной работы ЭРМ и шаговых электроприводов.

Шаговый способ поиска экстремума мощности наиболее приемлем для применения в автономных фотоэлектрических энергетических установках, так как согласование экстремального регулятора с зарядным устройством осуществляется достаточно просто путем дискретной перестройки цепи обратной связи в канале стабилизации напряжения солнечной батареи. Этот способ широко используется в фотоэлектрических системах электропитания автоматических космических аппаратов [1]. Экстремальный регулятор любого исполнения (аналого-цифровой, цифровой, микропроцессорный)

практически не увеличивает массу регулирующей аппаратуры, имеет незначительное энергопотребление и повышает эффективность использования солнечной батареи до 98–100% [1, 4].

На рис. 1 приведен эскиз механической системы вертикального и горизонтального вращения (по азимуту и углу места) фотоэлектрических панелей.

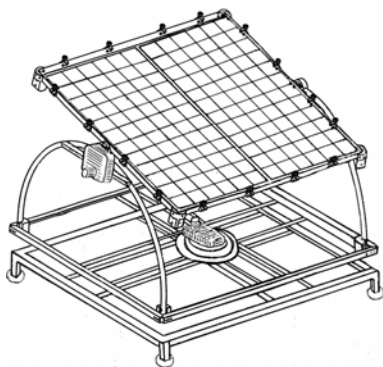


Рис. 1. Эскиз механической системы вертикального и горизонтального вращения фотоэлектрических панелей

Основные детали конструкции: рама с двумя фотоэлектрическими модулями КСМ-160 или КСМ-180; подвижный каркас; неподвижный каркас; редуктор поворота по углу места; редуктор поворота по азимуту; два шаговых двигателя типа ШД-5Д; два датчика положения Солнца.

Неподвижный каркас фотоэлектрической установки состоит из стальной сварной рамы из четырех уголков и профильных трубчатых элементов с четырьмя угловыми опорами и одной центральной опоры, в которой установлен вращающийся вал. Вращение вала обеспечивается за счет шагового двигателя ШД-5Д через червячный редуктор и цилиндрическую зубчатую передачу. Неподвижно закрепленный в каркасе нижний опорный узел, в котором вращение вала обеспечивается за счет применения в качестве центральной опоры сферического элемента, а также упорного и радиально-упорного подшипников позволяет обеспечить наименьшее трение в данном соединении.

Подвижный каркас установки состоит из стальной сварной рамы с закрепленной на ней ведомой шестерней, связанной также 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 с модулями КСМ-160 через муфту и червячный редуктор с шаговым двигателем ШД-5Д для обеспечения поворота по углу места.

В качестве силовых механизмов, обеспечивающих поворот фотоэлектрической установки используются червячные редукторы с передаточным отношением до 1 : 250, что позволяет использовать шаговые электродвигатели с номинальным вращающим моментом нагрузки – 0,1 Н·м. Червячные редукторы позволяют исключить самопроизвольное изменение положения установки относительно Солнца под действием ветровой нагрузки.

Структурно-функциональная схема проектируемой автономной фотоэлектрической энергетической установки приведена на рис. 2.

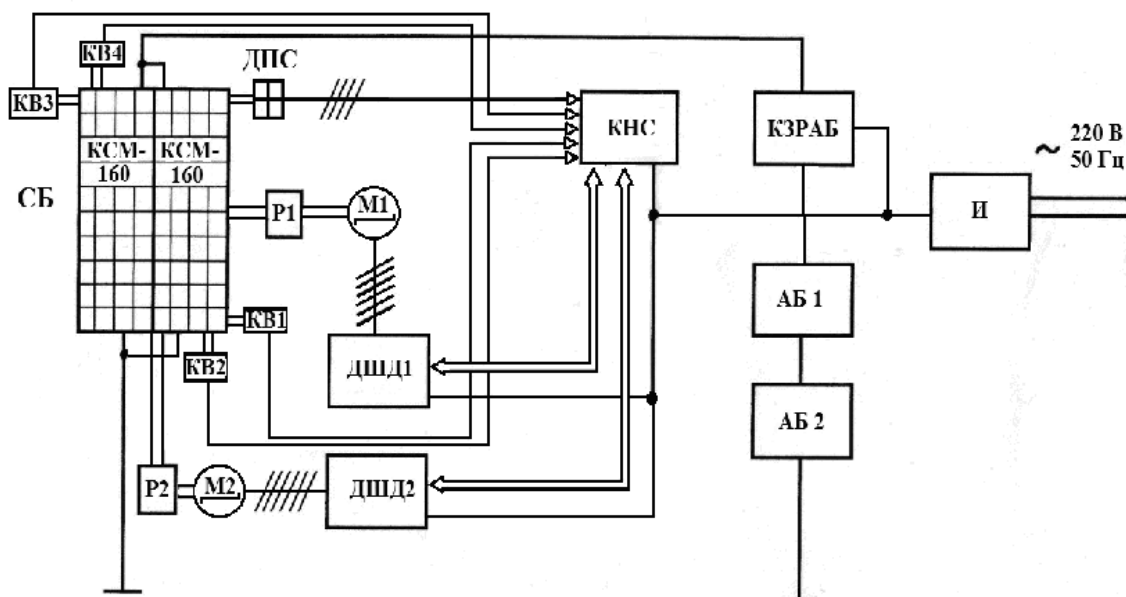


Рис. 2. Структурно-функциональная схема автономной фотоэлектрической энергетической установки

На рисунке приняты следующие обозначения: СБ – солнечная батарея; КЗРАБ – контроллер заряда-разряда АБ; И – инвертор; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи; М1, М2 – шаговые двигатели;

P1, P2 – редукторы; ДШД1, ДШД2 – драйверы управления шаговыми двигателями; ДПС – датчик положения Солнца; КНС – контроллер наведения на Солнце; КВ1-КВ4 – конечные выключатели.

Следящая система автоматического шагового управления, состоящая из двух датчиков положения Солнца, контроллера наведения на Солнце, двух шаговых двигателей с редукторами, двух силовых драйверов шаговых двигателей и четырех конечных выключателей, обеспечивает двухкоординатное механическое перемещение солнечной батареи по горизонтали – не менее 180 град, по вертикали – не менее 70 град.

Использование датчика положения Солнца, контроллера наведения и драйверов шаговых двигателей обеспечивает поворот фотоэлектрической установки относительно осей вращения дискретно на 1–5 град за один цикл перемещения, что позволяет сократить затраты энергии на перемещение при слежении за Солнцем. В моменты отсутствия наведения шаговые двигатели не потребляют энергии. Для уменьшения рывков и качаний при перемещении в контроллере для управления шаговыми двигателями используется режим позиционирования, т.е. идет ограничение по скорости и ускорению при перемещении от одного положения к другому. Ограничение критических углов поворота в обеих плоскостях обеспечивается конечными выключателями, закрепленными на неподвижной раме механической установки и контроллером наведения на Солнце.

В контроллере (КЗРАБ) используется схема зарядного устройства на основе понижающего преобразователя напряжения (ППН), представленная на рис. 3. Схема рассчитана из условия обеспечения минимума потерь мощности. В результате определена оптимальная частота преобразования 50 кГц, выбран силовой полевой транзистор IRFPS3810, имеющий низкое сопротивление канала.

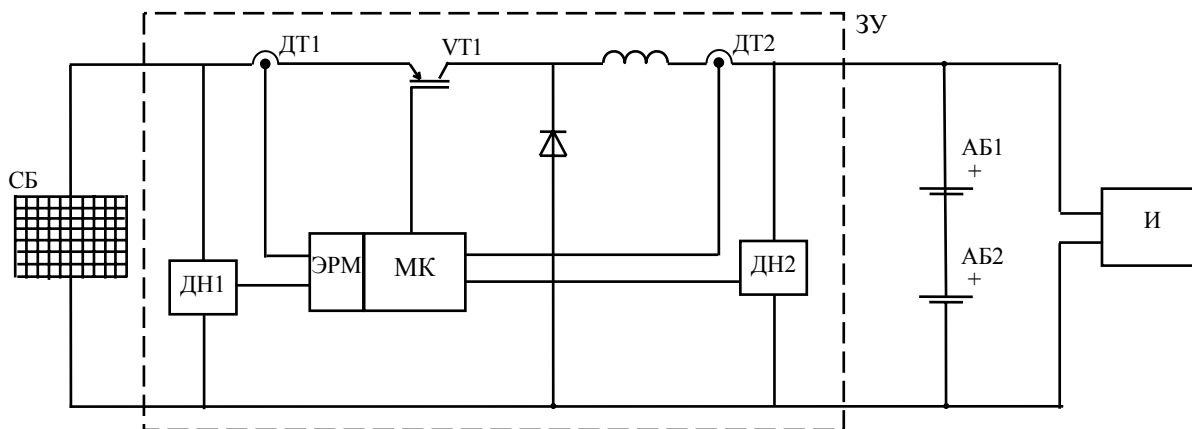


Рис. 3. Функциональная схема АФЭУ с реализацией функции экстремального регулирования мощности СБ

Управление зарядным устройством производится микроконтроллером (МК) Atmega128, совмещающим функции пользовательского интерфейса с формированием управляющего воздействия на силовой транзистор (VT1). Предусмотрено два режима работы, первый, ручной режим, – режим стабилизации напряжения СБ, в котором можно задать нужную рабочую точку на ВАХ СБ. Второй, автоматический режим, – режим ЭРМ СБ, в этом режиме происходит поиск рабочей точки ВАХ с максимальной выходной мощностью. Алгоритм работы обратной связи показан на рис. 4.

Перед включением зарядного устройства (ЗУ) производится опрос датчиков напряжения ДН1 и ДН2, только в том случае если напряжение холостого хода СБ превышает напряжение АБ, производится запуск ЗУ. Другим условием включения является неполный заряд АБ, что определяется по напряжению АБ, которое не должно превышать максимального значения.

Далее производится опрос режима работы ЗУ, определяющего требуемый режим обратной связи.

**Режим ЭРМ.** В этом режиме опрашиваются датчик тока СБ (ДТ1) и датчик напряжения СБ (ДН1), рассчитывается выходная мощность СБ. Полученное измеренное значение входной мощности  $P_{СБ\_NEW}$  сравнивается со значением мощности  $P_{СБ\_OLD}$ , измеренным до введения управляющего воздействия. Если  $P_{СБ\_NEW} > P_{СБ\_OLD}$ , знак управляющего воздействия ( $\Delta\gamma$ ) не изменяется, что говорит о правильном направлении движения рабочей точки по ВВХ.

Однако если происходит уменьшение мощности  $P_{СБ\_NEW} < P_{СБ\_OLD}$ , значит рабочая точка движется вниз по ВВХ, знак изменения напряжения СБ меняется на противоположный  $\Delta\gamma = -\Delta\gamma$ . Свойством алгоритма является непрерывное перемещение рабочей точки по ВВХ, что необходимо для

обнаружения экстремума ВВХ и поиска его нового значения при дрейфе ВВХ. После «захвата» максимума мощности положение рабочей точки колеблется в окрестности экстремального значения.

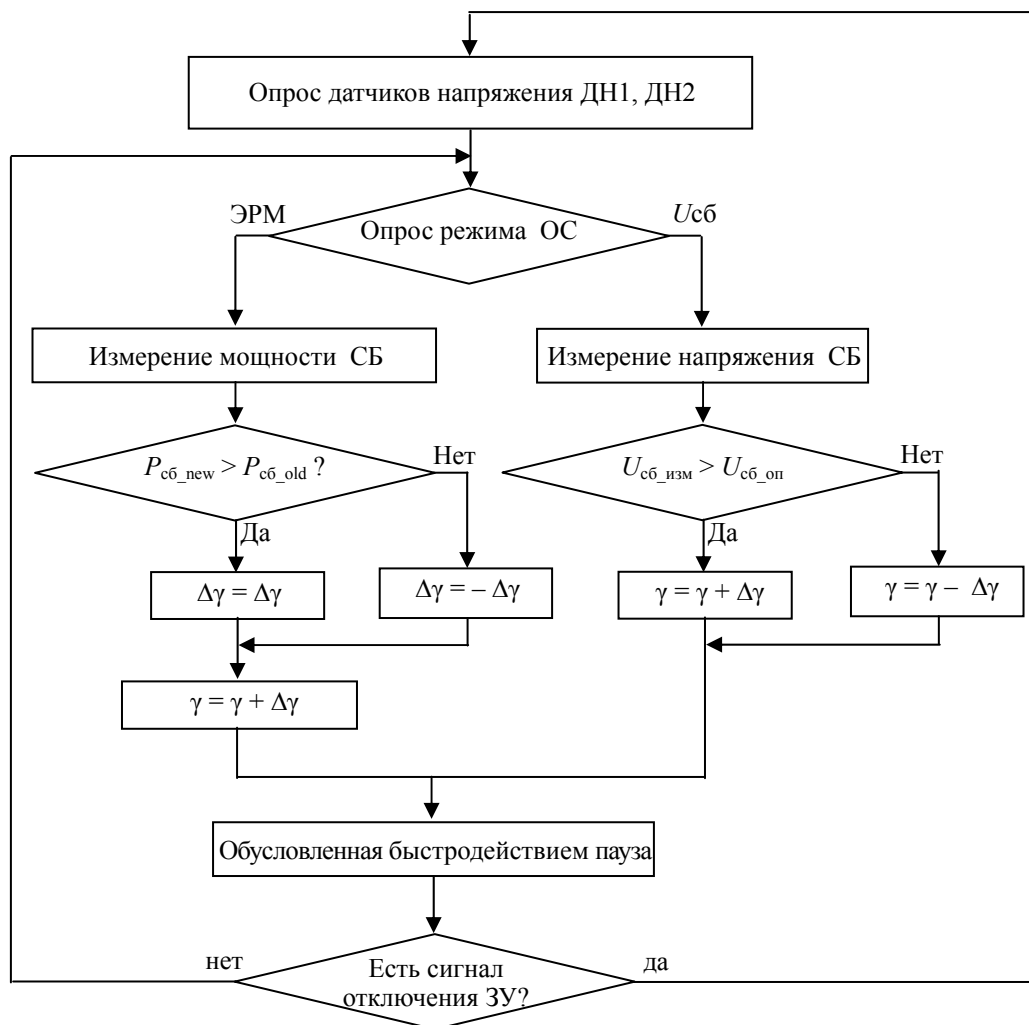


Рис. 4. Алгоритм обработки обратной связи (ОС)

В алгоритме присутствует пауза между введением управляющего воздействия и опросом измерительных датчиков, которая необходима для окончания переходных процессов вызванных управляющим воздействием, и измерения установившегося значения. Очевидно, что пауза определяет частоту управляющих воздействий и, соответственно, время поиска экстремума мощности, т.е. быстродействие обратной связи. Поэтому фактором, ограничивающим быстродействие ЗУ, является время переходных процессов в силовом преобразователе, определяемое инерционностью сглаживающих фильтров, включенных на его выходе.

Проектируемая энергетическая установка полностью автономная, будет иметь незначительные затраты энергии на обеспечение наведения на Солнце (затраты энергии будут определены на этапе экспериментальных исследований) и повышенную не менее чем на 30–50% энергетическую эффективность.

Разработка автономной фотоэлектрической энергетической установки с повышенной энергетической эффективностью выполняется в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (мероприятия 1.1, 1.2.1, 1.2.2).

#### Литература

1. Шиняков Ю.А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов / Ю.А. Шиняков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2007. – Вып. 1 (12). – С. 123–128.

2. Солнечные фотоэлектрические модули серии ТСМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.solarhome.ru/ru/pv/tcm.htm>, свободный (дата обращения: 22.09.2010).

3. Шиняков Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Аркатова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 2. – С. 102–107.

4. Варианты построения экстремальных шаговых регуляторов мощности солнечных батарей / Ю.А. Шиняков, К.Г. Гордеев, С.П. Черданцев, П.В. Обрусник // Труды ВНИИЭМ. Электромеханические устройства космических аппаратов (Москва). – 1997. – Т. 97. – С. 83–92.

---

**Шиняков Юрий Александрович**

Д-р техн. наук, директор НИИ космических технологий ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 90-01-62

Эл. почта: shua@main.tusur.ru

**Шурыгин Юрий Алексеевич**

Д-р техн. наук, ректор ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 51-05-30

Эл. почта: office@tusur.ru

**Аржанов Владимир Викторович**

Канд. техн. наук, зав. отделом №11 НИИАЭМ ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 55-78-43

Эл. почта: otde11tomsk@yandex.ru

**Осипов Александр Владимирович**

Канд. техн. наук, зав. лабораторией НИИАЭМ ТУСУРа

Тел.: +7-8-903-914-09-67

Эл. почта: ossan@mail.ru

**Теущаков Олег Александрович**

Гл. инженер ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 51-33-54

Эл. почта: toa@tusut.ru

**Аржанов Кирилл Владимирович**

Студент ТУСУРа

Тел.: 7 (382-2) 55-78-43

Эл. почта: rbhx@yandex.ru

Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., Arzhanov V.V., Osipov A.V., Teuschakov O.A., Arzhanov K.V.

**Stand-alone photovoltaic power plant with increased energy efficiency**

The article describes the results of conceptual design of an autonomous photovoltaic power system with extreme power control and automatic solar tracking of photovoltaic panels for sun power output of 0,5 kW.

**Keywords:** autonomous photovoltaic power system, solar panel, battery, energy efficiency, extreme power control of solar batteries, automatic tracking of photovoltaic panels at the Sun.