

УДК 621.31:620.91

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МИКРОМОЩНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Хомутов Станислав Олегович<sup>1</sup>,  
homutov.so@yandex.ru

Полищук Владимир Иосифович<sup>1</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

Сташко Василий Иванович<sup>1</sup>,  
altgtu@mail.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

**Актуальность.** Изменения геополитики и конъюнктуры мировых энергетических рынков всё больше и больше оказывают влияние на мировую экономику, вынуждая не только совершенствовать энергетические технологии, но и определять приоритеты государства в области энергетической политики. Такими приоритетами являются увеличение генерации от новых видов возобновляемых источников энергии и быстрое развитие соответствующих технологий, которые, в свою очередь, обеспечивают удешевление производства. Вместе с этим известно, что повысить надежность энергосистемы и одновременно увеличить производство электроэнергии можно за счет распределённой энергетики, основой которой является, в том числе, и микрогенерация от солнечных электростанций. В этой связи необходимы дополнительные исследования по адаптации существующих методик расчета фотоэлектрических систем к их использованию при разработке и построении маломощных солнечных электростанций. Актуальность обусловлена еще и тем, что необходимо создать максимально эффективную и недорогую систему преобразования солнечной энергии в электрическую, которая бы соответствовала любым заданным техническим требованиям, была надежной и простой в эксплуатации.

**Цель:** разработать эффективную фотоэлектрическую систему и создать недорогую микромощную солнечную электростанцию с заранее заданными параметрами и техническими характеристиками для дальнейших экспериментальных исследований.

**Методы.** При выполнении расчетов и исследовании основных режимов работы и элементов конструкции фотоэлектрических систем использовались результаты многочисленных научных исследований, в том числе и прикладных, и имеющийся на сегодняшний день опыт в области солнечной энергетики, который был получен при выполнении некоторых теоретических и экспериментальных работ. При разработке и моделировании электронных схем использовались многофункциональные системы DTP-Trace и EasyEDA.

**Результаты.** Обоснована целесообразность применения более простых методик определения вероятной или фактической инсоляции с использованием программного обеспечения PVsyst, и погрешностью расчетов за один год не более 10 %. Разработаны: 1) технология для экспериментального производства фотоэлектрических модулей заданных геометрических размеров и номинальной мощности; 2) надежная за счет актуаторов система управления двухосным солнечным трекером, повышающая эффективность фотоэлектрических систем в широтах Западной и Юго-Западной Сибири; 3) структурная схема управления микромощной солнечной электростанцией; 4) электронные схемы солнечного контроллера MPPT, преобразователя DC-DC, инвертора DC-AC и главного управляющего блока на основе микроконтроллера ATmega326.

### Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, солнечные электростанции, автономная система электропитания, фотоэлектрический модуль, фотоэлемент, солнечный контроллер, трекер, актуатор.

### Введение

Начавшиеся в первом десятилетии 2000-х гг. изменения в структуре использования энергетических ресурсов и рост производства электроэнергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) убедительно подтверждают тот факт, что мировая энергетика находится на пороге глобальных изменений. Необратимость перехода к следующему технологическому укладу обусловлена еще и тем, что одновременно с нарастающим износом основных фондов в энергетической отрасли динамично развиваются ресурсы распределённой энергетики, спрос на энергию растет, а модель поведения потребителей постепенно начинает изменяться [1].

По мнению экспертов, в ближайшие 3–5 лет передовые энергетические и информационные тех-

нологии, в результате конвергенции, будут полностью доминировать на рынках энергетического оборудования, инжиниринга, программных и прочих технических систем. В перспективе это позволит не только решить проблемы развития и эффективности функционирования отечественной энергетики, но и обеспечить национальную безопасность в этой сфере.

Анализ состояния и динамики развития существующих новых и перспективных энергетических технологий позволяет сделать вывод о том, что наиболее динамично в последние годы развивается солнечная энергетика [2, 3].

Согласно данным Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA), солнечная энергетика продемонстрировала впечатляющую

динамику развития, увеличив производство электроэнергии за 2008–2017 гг. в 25,7 раза [4]. Снижаются цены на оборудование для солнечных электростанций (СЭС), что ведет к снижению стоимости электроэнергии, которая уже к 2025 г., согласно ожиданиям IRENA, подешевеет на 57 % [5].

Дальнейшее экстенсивное наращивание традиционных генерирующих мощностей и электросетевой инфраструктуры не в лучшую сторону влияет на надежность всей энергосистемы, ведёт к росту потерь и увеличению эксплуатационных расходов. Качество электроэнергии в существующих централизованных системах электроснабжения также оказывает влияние на состояние электрооборудования, снижая его срок службы, что требует коррекции параметров надежности основных элементов системы электроснабжения [6].

В электроэнергетике существует множество самых разноплановых проблем, решить которые можно, в том числе, с помощью создания систем распределённой энергетики, основой которой являются ВИЭ. Этот процесс идет в настоящее время, но его темпы пока еще недостаточно высоки, так как имеющаяся энергосистема изначально создавалась как централизованная.

Для повышения темпов интеграции ВИЭ с существующей энергосистемой необходимо решить ряд технических задач, главная из которых заключается в непостоянстве выработки энергии и необходимости её накопления. Решить данную проблему можно путем объединения источников энергии в интеллектуальную систему – Smart Energy System, позволяющую накапливать и хранить не только электрическую, но и тепловую энергию, что гораздо дешевле и более эффективно [7, 8]. Безусловно, такой вариант развития электроэнергетики может иметь место, но создание Smart Energy System, кроме всего прочего, потребует, во-первых, немалых временных затрат, а во-вторых, она не может быть создана без достаточно развитой распределённой микрогенерации и так называемых MicroGrid – малых локальных сетей.

Таким образом, одним из наиболее оптимальных решений с целью более динамичного развития распределённой энергетики является разработка и внедрение электростанций небольшой мощности, в данном случае – микромощных СЭС. Причем независимо от мощности СЭС должна иметь устройство сопряжения с внешней сетью. Это позволит повысить эффективность микрогенерации, за счет использования MicroGrid как накопитель бесконечной емкости, мгновенно реагируя на спрос на электроэнергию из внешней сети или необходимость увеличения потребления собственной системой электроснабжения. Основные преимущества такой модели распределённой генерации заключаются в том, что она оказывает позитивное влияние на режимы работы электрических сетей с экономической точки зрения и значительно сокращает эксплуатационные затраты [9].

Анализ состояния рынка энергоустановок, которые работают на основе использования ВИЭ и могут быть использованы в качестве объектов распределённой мини- и микрогенерации [10], показывает, что солнечные электростанции небольшой мощности получают всё большее распространение.

Вместе с тем, несмотря на то, что распределённой энергетике и совершенствованию солнечных систем небольшой мощности в России уделяется достаточно большое внимание, массового распространения, как это происходит в других странах, эти технологии еще не получили.

Целью исследования является разработка эффективной и недорогой микромощной СЭС на основе использования имеющегося на сегодняшний день опыта в этой области, полученного при выполнении ряда теоретических и экспериментальных работ. Данные исследования носят прикладной характер и предполагают при создании экспериментальной установки использование только доступных средств разработки и технологий, недорогих комплектующих, электронных компонентов и материалов.

#### **Определение вероятной и фактической инсоляции**

Как правило, создание любых систем, использующих солнечную энергию, всегда начинается с определения вероятной или фактической инсоляции, определения эффективности СЭС для конкретных географических условий. В последние годы в сообществе ученых существуют различные, порой прямо противоположные, мнения по поводу рентабельности (ERoEI – Energy Return on Energy Invested) СЭС, размещаемых в регионах с умеренной инсоляцией [11–13]. Так как территория России в основном находится в географических широтах с умеренной и пониженной инсоляцией, то при расчетах поступающей солнечной энергии определяющими являются метеорологические условия и положение Солнца над горизонтом, которое изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от времени года. Поэтому расчет инсоляции требует особого внимания, так как даже малейшие ошибки на данном этапе проектирования могут негативно отразиться на конечном результате, резко понизив эффективность СЭС или увеличив расходы на её строительство.

Одна из основных проблем точного определения зависимости энергетических характеристик фотоэлектрических преобразователей (ФП) от уровня солнечного излучения заключается в том, что основные, оказывающие воздействующие на ФП факторы имеют стохастическую природу. Но зависимость характеристик ФП от внешних факторов, как и их нелинейность и другие особенности, давно изучены и широко используются в исследовательских и практических работах. При этом математическое моделирование солнечных систем выполняется с использованием специального программного обеспечения и баз данных, учитывающих реальную инсоляцию на конкретной

территории. Например, это могут быть базы данных NASA SSE или многолетние массивы данных метеостанций [13, 14]. Особо следует отметить имитационное моделирование, позволяющее с достаточной высокой точностью рассчитать значение солнечной радиации для любого местоположения СЭС и на любой день года. Таким образом, появляется возможность согласовать суточные объемы производства и потребления электроэнергии для конкретных реальных условий эксплуатации [15]. Вместе с тем для расчета параметров солнечных систем небольшой мощности объем вычислений и расчетов целесообразно максимально ограничивать. Например, судя по результатам применения более простых методик [16] с использованием программного обеспечения PVsyst, погрешность расчетов за период в один год может составлять максимум 10 %.

Таким образом, согласно методике оценки энергии солнечного излучения [17], рассчитаем полученную ФП за один месяц энергию  $W$  по формуле:

$$W = nW_{24}. \quad (1)$$

В формуле (1)  $W_{24}$  – суммарная энергия за характерные сутки месяца;  $n$  – количество дней в месяце. Суммарная суточная энергия  $W_{24}$  определяется следующим выражением:

$$W = \sum_{i=0}^{23} P_i. \quad (2)$$

В выражении (2)  $P_i$  – инсоляция каждого  $i$ -го часа характерных суток, которая вычисляется по формуле (3):

$$P_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{ij}, \quad (3)$$

где  $P_{ij}$  – почасовая мощность инсоляции каждого  $j$ -го дня месяца.

Использование заложенных в PVsyst статистических данных позволяет быстро рассчитать значение инсоляции ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), т. е. поступающую на поверхность ФП за сутки энергию, и построить годовой график выработки электроэнергии ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ ) по месяцам.

#### Расчет мощности фотоэлектрического модуля

Выбор мощности СЭС – это следующий важный этап исследований. В нашем случае для микрогенерации мощность может находиться в диапазоне 0,01–15 кВт, а при разработке экспериментальной установки она была выбрана в пределах 50–60 Вт.

Фактически все исследователи при разработке или испытаниях различных систем преобразования солнечной энергии в электрическую используют готовые промышленные солнечные панели. Это оправдано тем, что любые имеющие практическую ценность исследования, результаты которых в ближайшей перспективе могут получить широкое распространение, нецелесообразно проводить с использованием в конструкции экспериментальной

установки уникальных и дорогостоящих компонентов, комплектующих, материалов и т. д. Однако, если изготовление фотоэлектрических элементов – это сложный и регламентированный процесс, доступный только для крупных промышленных производств, то изготовление экспериментального фотоэлектрического модуля (ФМ) из готовых фотоэлементов вполне возможно в обычных лабораторных условиях.

В этой связи ниже приводится технология изготовления ФМ, которая может быть полезной не только для тех, кто занимается исследованиями, но и для предпринимателей или представителей бизнеса, пожелавших освоить на своих предприятиях выпуск новой высокотехнологичной продукции.

Мощность создаваемого ФМ будет зависеть от двух главных параметров: площади активной поверхности и КПД фотоэлементов, из которой она состоит. Сегодня наибольшее распространение получили фотоэлементы, изготовленные на основе моно- и поликристаллического кремния, которые способны генерировать напряжение около 0,5 В. Соответственно, ток и мощность фотоэлементов определяется их геометрическими размерами и особенностью технологии изготовления, например, числом токопроводящих шин ВВ (bus bar). Основные параметры и характеристики некоторых фотоэлементов, представлены в таблице.

Таблица. Характеристики фотоэлементов

Table. Characteristics of solar cells

Исходный материал, кремний Source material, silicon	Размеры, мм Dimensions, mm	Число ВВ Number of bus bar	Ток, А Electric current, A	Мощность, Вт Power, W	КПД, % Efficiency, %
Монокристаллический Monocrystalline	156×156	4	9,6	4,8	19,4
	156×156	3	8,9	4,6	19,0
	125×125	2	5,4	2,7	17,6
Поликристаллический Polycrystalline	156×156	4	8,8	4,4	18,8
	156×156	3	8,4	4,2	18,0
	152×52	3	2,8	1,4	17,5
	52×52	1	0,86	0,43	17,0

Мощность  $P$  одного ФМ рассчитывается по следующей формуле:

$$P = \sum_{n=1}^n U_{mp} I_{mp}. \quad (4)$$

Значения  $U_{mp}$  и  $I_{mp}$  в формуле (4) – это напряжение и ток при максимальной мощности, а  $n$  – число последовательных соединенных фотоэлементов.

Таким образом, зная стандартные размеры фотоэлементов и требуемую мощность, можно рассчитать площадь  $S_M$ , предварительно определив длину  $L_M$  (5) и ширину  $B_M$  (6) активной части модуля:

$$L_M = n_y l_L + (n_y d_y), \quad (5)$$

$$B_M = n_x l_B + (n_x d_x), \quad (6)$$

где  $n_y$  и  $n_x$  – число элементов по длине и ширине ФМ;  $l_L$  – длина одного элемента (определяется направлением вдоль шин ВВ);  $l_B$  – ширина одного элемента;  $d_y$  и  $d_x$  – расстояние между элементами по длине и ширине соответственно.

У автономных СЭС номинальное напряжение ФМ должно соответствовать напряжению накопителей электроэнергии, в качестве которых используются различные типы аккумуляторных батарей, напряжение которых чаще всего равно 12 В. Аккумуляторы могут соединяться параллельно, увеличивая емкость, или последовательно, увеличивая напряжение с 12 до 24, 36, 48 В, и т. д. Именно эти значения и определяют значение напряжения массива или одиночного ФМ.

У сетевых СЭС, как правило, отсутствует необходимость в преобразовании постоянного напряжения из низкого в высокое посредством повышающего преобразователя DC/DC (boost converter), так как требуемое напряжение получают путем последовательного соединения нескольких солнечных модулей. Это уменьшает величину постоянного тока при его преобразовании в переменное синусоидальное, что повышает надежность и эффективность инвертора. Поэтому при выборе напряжения модуля главной характеристикой является  $U_{mp}$  – напряжение при максимальной мощности, от которого будет зависеть и значения  $U_{oc}$  – напряжение холостого хода, и  $I_c$  – ток короткого замыкания. Соответственно, минимальное число элементов  $n$  может быть определено следующим выражением:

$$n \geq U_{mp} / U_{sc}, \quad (7)$$

где  $U_{sc}$  – напряжение одного фотоэлемента.

В результате, по формуле (7) находим оптимальное значение  $n$ , которое будет равно 36 для систем на 12 В, и 72 – для систем на 24 В. Такое количество фотоэлементов обеспечивает необходимое напряжение 18 или 32 В и ток для зарядки одного или соединенных последовательно двух аккумуляторов. Соответственно, при использовании фотоэлементов размером 156×156 мм (таблица) размеры и мощность ФМ будут максимальным. Если требуется мощность меньше, то используются фотоэлементы меньшего размера. Например, разрезав фотоэлемент (кремневую пластину) мощностью в 4,2 Вт на две части, вместе с уменьшением площади в два раза, до 2,1 Вт, уменьшится и мощность.

В данной исследовательской работе для экспериментальной установки требовался близкий к квадратной форме модуль мощностью 50–60 Вт и напряжением  $U_{mp}$  15–25 В. Для его изготовления были выбраны поликристаллические элементы 156×156 мм, 4ВВ, мощностью 4,4 Вт (рис. 1).

Расчеты выполнялись для двух вариантов разрезания кремневой пластины: разрезание на две равные части; разрезание на три равные части.

При разрезании фотоэлемента на две равные части, при  $n=36$ , мощность ФМ составила 79 Вт, а

размеры – 628×711 мм, при  $d_y=d_x=1$  мм. Разрезав элемент на три части, суммарная мощность 36 последовательно соединенных фотоэлементов составила 50 Вт, а размеры – 628×477 мм.

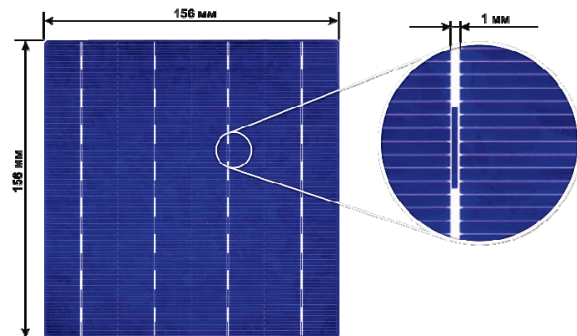


Рис. 1. Поликристаллический фотоэлемент 4,4 Вт (4ВВ)

Fig. 1. Polycrystalline solar cell with 4,4 W (4BB)

Данный вариант конструкции и был выбран за основу, но в каждую последовательную цепочку из девяти фотоэлементов было добавлено еще по три. В результате размеры составили 628×636 мм,  $n=48$ ,  $P=67$  Вт, а  $U_{mp}=24$  В, т. е. добавленная площадь в 0,0998 м<sup>2</sup> увеличила производительность ФМ на 34 %. Схема соединений фотоэлементов в ФМ представлена на рис. 2, добавленные фотоэлементы выделены зеленым цветом.

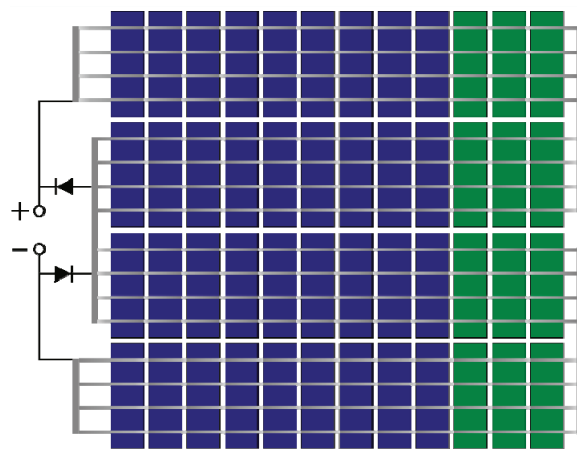


Рис. 2. Схема подключения солнечных элементов в модуле

Fig. 2. Scheme of solar cells connection in the module

Особенностью микромощных СЭС являются их небольшие размеры и возможная работа в условиях искусственного затенения. Обычно при естественном полном или частичном затенении (облачность, снег, дождь) недостающая мощность компенсируется установкой дополнительных модулей, что требует наличия дополнительной площади. Если такой возможности нет, то установка солнечной электростанции в данном месте будет заведомо экономически невыгодна. При искусственном затенении, когда, например, СЭС находится в тени здания до или после полудня, компенсировать потери энергии можно за счет постоянной

ориентации ФМ перпендикулярно потоку солнечного излучения до конца светового дня или до образования тени. Соответственно, если отслеживать положение Солнца при отсутствии искусственного затенения – эффективность СЭС будет максимальной.

Анализ исследовательских работ [18–26] показывает, что солнечные трекеры (solar tracker – отслеживание Солнца) способны повысить эффективность СЭС до 50 %. Максимальные расчетные значения увеличения выработанной модулем мощности для одноосной системы составляют около 35 %, для двухосной – до 55 %.

#### Повышение эффективности СЭС с помощью трекеров

Исследования различных типов трекеров, в том числе предназначенных для солнечных концентраторов и коллекторов, показали, что отслеживание изменяющейся в течении дня эклиптики гораздо важнее, чем отслеживание угла Солнца относительно горизонта, которое дает прибавку к мощности в 7–10 %. Такой подход упрощает систему фактически в два раза и, соответственно, повышает её надежность. Тем не менее, усложнение механики трекера (перемещение в двух плоскостях вместо одной) оправдывается экспериментальными исследованиями, где полученные результаты отличаются от расчетных. Так, двухосный солнечный трекер [27] при испытании в пасмурную погоду увеличил выработку на 9,87 %, а в солнечные дни [28] – до 20 % и более.

В ряде работ указывается, что чем ближе СЭС к экватору, тем меньше эффект от использования даже одноосевого трекера [29]. По данным из других исследовательских работ, мощность, вырабатываемая СЭС с подвижной системой ФМ, на экваторе и на полюсе отличается незначительно, примерно на 5 %. При этом результаты сравнения энергоэффективности неподвижных и подвижных солнечных систем для географического положения г. Томска (56°29' с. ш., 84°58' в. д.) показывают,

что отношение мощности к площади ФМ подвижной конструкции даже зимой (угол максимального подъема Солнца 10°) на 27 Вт/м<sup>2</sup> больше, чем для неподвижной [30].

При рассмотрении существующих в России (Челябинская, Оренбургская, Томская области) систем слежения за солнцем и систем, которые испытаны в текущем году, были проанализированы различные обоснования необходимости внедрения ФМ с солнечными трекерами. Наиболее ценными являются результаты исследований, в процессе проведения которых была экспериментально доказана высокая эффективность применения следящих систем, позволяющих увеличить КПД ФМ до 50 % [31].

Как уже было отмечено, основная проблема подвижных систем слежения за солнцем – это надежность мехатроники, которая почти в 5 раз ниже, чем у неподвижных систем. В этой связи в разрабатываемой микромощной СЭС в качестве основных элементов конструкции трекера наиболее подходящим вариантом является использование линейных актуаторов или актуаторов вращения. Современные актуаторы могут работать в любых погодных условиях, не боятся воды и пыли, надежны и долговечны.

Схема управления актуаторами стандартная, с двумя мостовыми выходными каскадами, подключенными к цифровым выходам микроконтроллера, на аналоговые входы которого поступают сигналы с четырех датчиков освещения (рис. 3).

#### Разработка схемы управления микромощной солнечной электростанцией

Следующей важной частью солнечной электростанции любого типа является так называемый солнечный котроллер – преобразователь напряжения DC-DC (direct current – постоянный ток), одной из основных функций которого является регулирование заданных параметров напряжения и тока зарядки аккумуляторной батареи (АБ). Харак-

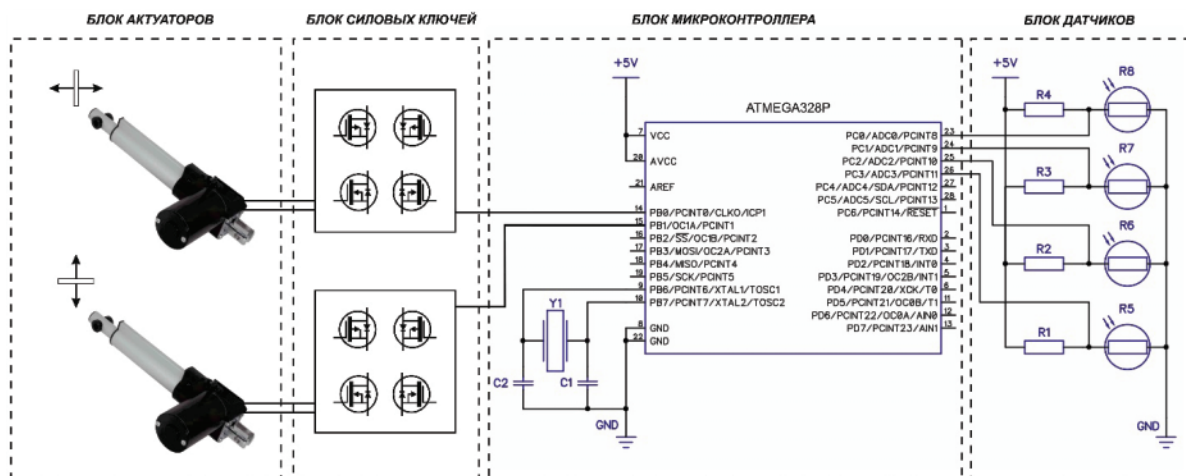


Рис. 3. Схема управления солнечным трекером

Fig. 3. Control circuit of a solar tracker

теристики разных типов АБ имеют различия по параметрам зарядки и разрядки, небольшие отклонения от которых ведут к значительному сокращению периода эксплуатации. Выработка электроэнергии СЭС непостоянна в течение всего светового дня, может резко изменяться в короткие промежутки времени и зависит не только от внешних воздействующих факторов, но и от величины потерь, которые могут быть в самой СЭС, т. е. уже после преобразования солнечной энергии в электрическую.

Для уменьшения потерь и повышения КПД в большинстве случаев применяются простые схемы непосредственных преобразователей напряжения, с минимальным количеством силовых ключей [32–34]. Однако недостатком такого решения является предельный режим работы переключения силового транзистора, требующий введения демпфирующих пассивных цепей, что сопровождается нежелательным переходным процессом, который, в свою очередь, ограничивает частоту переключения.

Наиболее перспективным является построение DC-DC преобразователей по вольтодобавочной топологии, которая позволяет разделить ток ФМ по нескольким мостовым преобразователям, что существенно уменьшает статические потери [35]. Таким образом, обеспечение LCL-T контуром мягкой коммутации транзисторов позволяет получить достаточно высокий КПД преобразования, выше 98 %. Вместе с тем отмечается [36], что, например, при работе систем электропитания геофизических приборов могут быть кратковременные перегрузки, из-за которых DC-DC преобразователь с вольтодобавочной схемой может перейти в режим ограничения тока. Поэтому предлагается ввести в схему дискретный переключатель, который при перегрузке позволяет вручную перевести преобразователь из вольтодобавочного режима в классический резонансный.

Учитывая вышеизложенное, при разработке солнечного контроллера для микроомощной СЭС в части преобразователя DC-DC решено все функции по контролю за входными и выходными параметрами, а также управление режимами работы автоматизировать посредством применения в схеме микроконтроллера.

Регулирование необходимых параметров напряжения и тока зарядки АБ в современных СЭС – это только одна, безусловно важная, часть солнечного контроллера, которая может быть выполнена по максимально упрощенной схеме в виде контроллера, регулирующего ток и напряжение с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Устройства такого типа в солнечной энергетике называют PWM (pulse-width modulation) контроллерами. Вторая, не менее важная часть всей системы вторичного преобразования энергии в высокоэффективной СЭС – это МРРТ (maximum power point tracking) устройство отслеживания точки максимальной мощности.

Мощность солнечного излучения в суточном цикле изменяется в достаточно широких пределах от нуля до максимума, и, следовательно, количество вырабатываемой СЭС энергии также является переменным. Всё это, вместе с другими факторами, оказывающими влияние на эффективность фотоэлектрической системы, требует постоянной настройки вторичных, адаптивных преобразователей электроэнергии. Эту функцию выполняют контроллеры МРРТ, работающие по одному из двух алгоритмов: с подбором шага (адаптивный) или возмущения и наблюдения (неадаптивный) [37].

По имеющимся данным, полученным в результате исследований алгоритмов поиска точки максимальной мощности, наиболее эффективным является алгоритм подбора шага, так как при этом точность регулирования основных параметров (ток, напряжение, мощность) увеличивается до 99 % [38].

Результаты многочисленных исследований подтверждают, что алгоритм подбора шага (с нечетким логическим шагом или комбинированный с фиксированным), применяемый в контроллерах МРРТ фотоэлектрических систем, является наиболее эффективным (эффективность отслеживания до 99,6 %) по сравнению с алгоритмом фиксированного размера шага [39–48].

Структурная схема предлагаемой к реализации системы управления микроомощной СЭС на основе микроконтроллера ATmega326 представлена на рис. 4. Данный микроконтроллер используется в популярной платформе аппаратно-программных средств «Ардуино», которая широко используется для построения различных автоматизированных систем и экспериментальных исследований, в том числе, и в системах солнечной энергетики [23, 48].

Кроме рассмотренных в данной публикации основных элементов и функциональных блоков микроомощной СЭС, на рис. 4 представлены блоки 6–9. Блок накопителей – 6 может состоять из различного количества аккумуляторных батарей, общая емкость которых зависит от мощности ФМ. В данном конкретном случае для ФМ мощностью 60 Вт необходимо устанавливать одну батарею на 18 А·ч или две соединенные параллельно по 12 А·ч для мобильного/переносного варианта СЭС, две соединенные параллельно батареи 18 А·ч – для стационарного варианта.

Блок индикации – 7 предназначен для вывода информации о состоянии всех основных блоков СЭС, ручного программирования режимов работы и отображения статистических данных. Он выполнен по стандартной схеме на основе дисплея LCD 1602 или LCD 2004, подсоединенного к микроконтроллеру по интерфейсу I2C/ПЦ.

Инвертор DC-AC – 8 служит для преобразования постоянного тока (12–24 В) в синусоидальный переменный ток напряжением 220 В. Выходная мощность инвертора разрабатываемой СЭС также зависит от мощности ФМ и емкости аккумулятор-

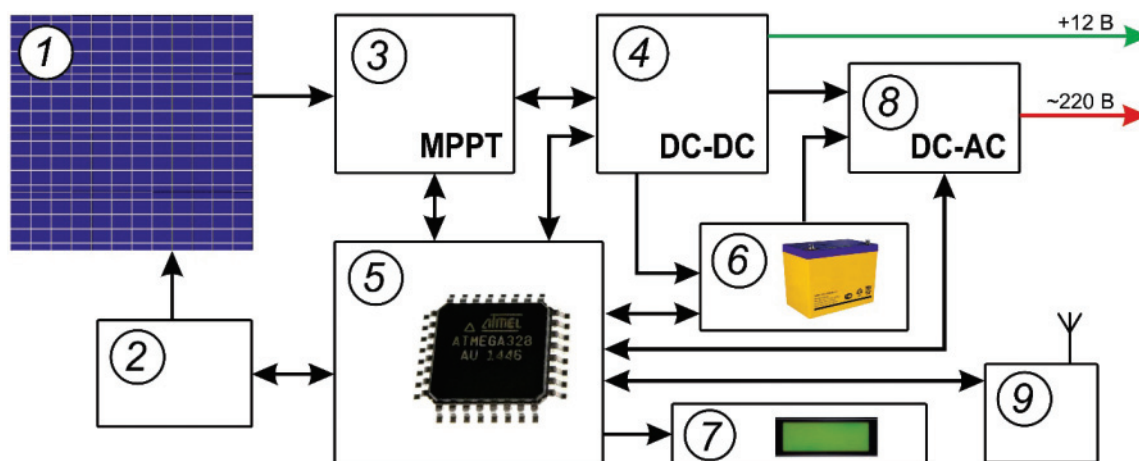


Рис. 4. Структурная схема управления микромощной солнечной электростанцией: 1 – ФМ; 2 – трекер; 3 – MPPT; 4 – преобразователь DC-DC; 5 – блок микроконтроллера; 6 – блок накопителей (аккумуляторных батарей); 7 – блок индикации; 8 – инвертор DC-AC (преобразователь постоянного тока в синусоидальный переменный); 9 – блок связи с внешними устройствами и удаленного управления

Fig. 4. Block diagram of micro-power solar power plant control: 1 – solar panel; 2 – solar tracker; 3 – MPPT; 4 – DC-DC converter; 5 – micro-controller unit; 6 – energy storage (battery); 7 – display unit; 8 – DC converter into a sinusoidal alternating current; 9 – communication unit with external devices and remote control

ных батарей и в данной разработке составляет 50 Вт. Формирователь переменного напряжения частотой 50 Гц для инверторов мощностью до 0,1 кВт выполнен по упрощенной схеме, с использованием микросхемы TL494CN (КР1114ЕУ4 – отечественный аналог) и низкочастотного выходного трансформатора. Для более мощных инверторов используется промышленная плата «чистый синус» с микросхемой EG8010 и двумя полумостовыми драйверами IR2110 или IR2113.

Основная проблема современных преобразователей DC-AC – это невысокий КПД и достаточно высокое собственное потребление. Поэтому с целью повышения экономичности инвертор включается в работу только при необходимости использования переменного напряжения 220 В, а контроль режима его работы осуществляется блоком микроконтроллера – 5.

Блок – 9 служит для подключения к микромощной СЭС внешних устройств и обеспечения удаленного доступа. Данный блок является опциональным, но его наличие в экспериментальной установке является очень важным, так как это позволяет в режиме реального времени отслеживать состояние всех функциональных блоков и вести сбор статистических данных. В настоящее время рассматривается реализация нескольких вариантов построения этого блока, в зависимости от способа подключения к сети Интернет. Это может быть Wi-Fi на основе широко распространенного модуля с контроллером ESP8266, модем GSM на основе SIM800L или обычный сетевой интерфейс Ethernet на основе ENC28J60.

Все схемы и печатные платы электронных блоков разработаны с помощью многофункциональной САПР DipTrace и онлайн-редактора схем и печатных плат EasyEDA. Эскиз переносной СЭС мощностью 60 Вт представлен на рис. 5.

нальной САПР DipTrace и онлайн-редактора схем и печатных плат EasyEDA. Эскиз переносной СЭС мощностью 60 Вт представлен на рис. 5.



Рис. 5. Эскиз переносной микромощной солнечной электростанции

Fig. 5. Sketch of portable micro-powerful solar power plant

#### Заключение

1. Применение сложных методик расчета инсоляции при разработке микромощных солнечных электростанций фактически не влияет на результат, а погрешность при использовании менее сложных методик расчетов может составлять не более 10 % за период в один год.

2. Предложена несложная технология изготовления экспериментальных фотоэлектрических модулей заданной мощности, размеров и геометрической формы.
3. На основе анализа теоретических и экспериментальных разработок в области систем слежения за солнцем разработана система управления двухосным солнечным трекером на основе актуато-

ров. Данная система позволяет повысить эффективность фотоэлектрических систем в широтах Западной и Юго-Западной Сибири до 50 %.

4. Снижение потерь при вторичном преобразовании полученной от фотоэлектрических преобразователей энергии достигнуто благодаря использованию главного управляющего блока на основе микроконтроллера ATmega326.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strategic prospects of the electric power industry of Russia / A.A. Makarov, F.V. Veselov, A.S. Makarova, T.V. Novikova, T.G. Pankrushina // *Thermal Engineering*. – 2017. – V. 64. – Iss. 11. – P. 817–828. URL: <https://doi.org/10.1134/S0040601517110064> (дата обращения 11.01.2019).
2. Cherepovitsyn A., Tsvetkov P. Overview of the prospects for developing a renewable energy in Russia // *Proc. of 2017 International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2017*. – P. 113–118. DOI: 10.1109/ICGEA.2017.7925466
3. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on renewable sources: Prospects for the world and for Russia // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 1 November 2016. – V. 86. – Iss. 6. – P. 433–440.
4. IRENA (2018), Renewable capacity statistics 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. URL: <https://ru.scribd.com/document/382990659/IRENA-RE-Capacity-Statistics-2018> (дата обращения 10.01.2019).
5. IRENA (2016), The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_Power\\_to\\_Change\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf) (дата обращения 10.01.2019).
6. Ustinov D.A., Baburin S.V. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters // *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. – 2016. – V. 11. – Iss. 7. – P. 5267–5270.
7. Energy storage and smart energy systems / H. Lund, P.A. Østergaard, D. Connolly, I. Ridjan, B.V. Mathiesen, F. Hvelplund, J.Z. Thellufsen, P. Sorknes // *Int. J. Sustainable Energy Plann. Manage.* – 2016. – V. 11. – P. 3–14. URL: <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2> (дата обращения 11.01.2019).
8. Smart energy systems for coherent 100 % renewable energy and transport solutions / B.V. Mathiesen, H. Lund, D. Connolly, H. Wenzel, P.A. Østergaard, B. Möller, S. Nielsen, I. Ridjan, P. Karnøe, K. Sperling, F.K. Hvelplund // *Appl. Energy*. – 2015. – V. 145. – P. 139–154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075> (дата обращения 11.01.2019).
9. Wang Y, Huang Y, Wang Y, Li F, Zhang Y, Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. *Sustainability*. – 2018. – V. 10. – Iss 3. – P. 847. URL: <https://doi.org/10.3390/su10030847> (дата обращения 11.01.2019).
10. Abramovich B.N., Prochorova V.B., Sychev Yu.A. The Application of Modern Information Technologies for Power Monitoring and Control in Conditions of Distributed Generation // *Proc. of the 16<sup>th</sup> conference of FRUCT association*. – Oulu, Finland, 27–31 October, 2014. – P. 3–8. DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938.
11. Ferroni F., Hopkirk R.J. Energy Return on Energy Invested (EROI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation // *Energy Policy*. – 2016. – V. 94. – P. 336–344.
12. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for Photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: a comprehensive response / M. Raugei, S. Sgouridis, D. Murphy, V. Fthenakis, R. Frischknecht, Ch. Breyer, U. Bardi, Ch. Barnhart, A. Buckley, M. Carbajales-Dale, D. Csala, M. de Wild-Scholten, G. Heath, A. Jäger-Waldau, Ch. Jones, A. Keller, E. Leccisi, P. Mancare-
- lla, N. Pearsall, A. Siegel, W. Sinke, Ph. Stolz // *Energy Policy*. – 2017. – V. 102. – P. 377–384.
13. Ferroni F., Guekos A., Hopkirk R.J. Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (EROEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation // *Energy Policy*. – 2017. – V. 107. – P. 498–505. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.007> (дата обращения 11.01.2019).
14. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28–37.
15. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов FM 12 Супор и МЕТАР в системных энергетических исследованиях // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 69–88.
16. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.
17. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 49–55.
18. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels / F.M. Hoffmann, R.F. Molz, J.V. Kothe, E.O.B. Nara, L.P.C. Tedesco // *Renewable Energy*. – 2018. – V. 115. – P. 750–759. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.079.
19. An economical, two axes solar tracking system for implementation in Brazil / D.R. Carvalho, A.F. Lacerda Filho, R.C. Resende, M.A. Possi, J.P. Kruckeberg // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2013. – V. 29. – Iss. 1. – P. 123–128. DOI: 10.13031/2013.42525.
20. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption / G.C. Lazaroiu, M. Longo, M. Roscia, M. Pagano // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 92. – P. 143–148. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.046.
21. Tharamuttam J.K., Ng A.K. Design and Development of an Automatic Solar Tracker // *Energy Procedia*. – 2017. – V. 143. – P. 629–634.
22. A solar automatic tracking system that generates power for lighting greenhouses / Q.-X. Zhang, H.-Y. Yu, Q.-Y. Zhang, Z.-Y. Zhang, C.-H. Shao, D. Yang // *Energies*. – 2015. – V. 8. – Iss. 7. – P. 7367–7380. DOI: 10.3390/en8077367.
23. New prototype of photovoltaic solar tracker based on Arduino / C. Morón, D. Ferrández, P. Saiz, G. Vega, J.P. Diaz // *Energies*. – 2017. – V. 10. – Iss. 9. – Article no. 1298. DOI: 10.3390/en10091298.
24. Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement / S. Skouri, A. Ben Haj Ali, S. Bouadila, M. Ben Salah, S. Ben Nasrallah // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 60. – P. 1419–1429. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.006.



25. Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics / S.J. Oh, M. Burhan, K.C. Ng, Y. Kim, W. Chun // *International Journal of Energy Research*. – 2015. – V. 39. – Iss. 7. – P. 965–976. DOI: 10.1002/er.3306.
26. Fathabadi H. Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers // *Solar Energy*. – 2016. – V. 138. – P. 67–76. DOI: 10.1016/j.solener.2016.09.009.
27. Algarin C.R., Castro A.O., Naranjo J.C. Dual-Axis Solar Tracker for Using in Photovoltaic Systems // *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2017. – V. 7. – № 1. – P. 137–145.
28. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations / S. Yilmaz, H. Ozcalik, O. Dogmus, F. Dincer, O. Akgol, M. Karaaslan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. United Kingdom. – March 2015. – V. 43. – P. 997–1005.
29. Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator / R. Vieira, F. Guerra, M. Vale, M. Araújo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – October 2016. – V. 64. – P. 672–681.
30. Энергоэффективность подвижных и неподвижных конструкций солнечных панелей / К.А. Гросс, П.Я. Крауиньш, Д.П. Крауиньш, М.С. Кухта, А.П. Соколов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 113–122.
31. Митрофанов С.В., Немальцев А.Ю., Байкашенов Д.К. Первичная апробация автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера в климатических условиях Оренбургской области как перспектива создания программно-аппаратного комплекса // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2018. – № 7–9 (255–257). – С. 43–54.
32. Вопросы линеаризации математической модели преобразователя напряжения, применяемого в системах электропитания, работающих на основе возобновляемых источников энергии / Р.К. Диксон, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, В.А. Русскин, С.М. Семенов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 89–99.
33. Mikhachenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter // 17<sup>th</sup> International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices. – Erlagol, Russia, 2016. – P. 507–511.
34. 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.
35. Осипов А.В., Запольский С.А. Вольтодобавочный резонансный LCL-T преобразователь для автономных систем электропитания на возобновляемых источниках энергии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 77–88.
36. Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания / А.В. Осипов, Е.В. Ярославцев, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 27–37.
37. Подход к построению адаптивного алгоритма экстремального регулирования мощности в системе солнечной энергетики / С.Г. Михальченко, В.А. Русскин, С.М. Семенов, И.П. Орлянский, С. Хэллз // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 102–112.
38. Русскин В.А., Семенов 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.
39. Macaulay, J., Zhou, Z. A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System // *Energies*. – 2018. – V. 11. – Iss. 6. DOI: 10.3390/en11061340.
40. Al-Majidi S.D., Abbod M.F., Al-Raweshdy H.S. A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43. – Iss. 31. – P. 14158–14171.
41. Framework of Maximum Power Extraction from Solar PV Panel Using Self Predictive Perturb and Observe Algorithm / N. Kumar, I. Hussain, B. Singh, B.K. Panigrahi // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. – 2018. – V. 9. – Iss. 2. – P. 895–903. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2764266.
42. Fireworks enriched P&O algorithm for GMPPT and detection of partial shading in PV systems / C. Manickam, G.P. Raman, G.R. Raman, S.I. Ganesan, N. Chilakapati // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2017. – V. 32. – Iss. 6. – P. 4432–4443. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2604279.
43. Ahmed J., Salam Z. An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*. – 2015. – V. 150. – P. 97–108. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.006.
44. Baraskar S., Jain S.K., Padhy P.K. Fuzzy logic assisted P and O based improved MPPT for photovoltaic systems // *International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems, ICETEESSES 2016*. Article no. 7581369. – P. 250–255. DOI: 10.1109/ICETEESSES.2016.7581369.
45. Y?ksek, G.; Mete, A.N. A hybrid variable step size MPPT method based on P&O and INC methods. In *Proceedings of the 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2017*. – Bursa, Turkey, 2017. – P. 949–953.
46. Harrag A., Messalti S. Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 49. – Article no. 4432. – P. 1247–1260. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.003.
47. MPPT for PV system based on variable step size P & O algorithm / A. Jusoh, R. Alik, T.K. Guan, T. Sutikno // *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. – 2017. – V. 15. – Iss. 1. – P. 79–92. DOI: 10.12928/telkommika.v15i1.3160.
48. Implementation in arduino of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations / M. Elyaqouti, S. Hakim, S. Farhat, L. Bouhouch, A. Ihlal // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2017. – V. 8. – Iss. 1. – P. 434–443.

Поступила 15.01.2019 г.

#### Информация об авторах

**Хомутов С.О.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

**Полищук В.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

**Сташко В.И.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

UDC 621.31:620.91

## STUDY OF THE BASIC OPERATION MODES AND STRUCTURAL COMPONENTS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS TO CONSTRUCT A MICROPOWER SOLAR POWER PLANT

Stanislav O. Khomutov<sup>1</sup>,  
khomutov.so@yandex.ru

Vladimir I. Polishchuk<sup>1</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

Vasilii I. Stashko<sup>1</sup>,  
stashko@list.ru

<sup>1</sup> Polzunov Altai State Technical University,  
46, Lenin avenue, Barnaul, 656038, Russia.

**The relevance.** Changes in geopolitics and conjuncture of the world energy markets, impact more and more the world economy, forcing not only to improve energy technologies, but also to determine the priorities of the state in the field of energy policy. One of these priorities is to increase generation from new types of renewable energy sources and rapid development of appropriate technologies, which, in their turn, provide cheaper production. At the same time, it is known that it is possible to increase the reliability of the power system and at the same time to increase the production of electricity at the expense of distributed energy, the basis of which is micro-generation from solar power plants. In this regard, additional research is needed to adapt the existing methods of calculation of photovoltaic systems to their use in development and construction of low-power solar power plants. The relevance is also caused by the fact that it is necessary to create the most effective and inexpensive system for converting solar energy into electrical energy, which would meet any given technical requirements, would be reliable and easy to operate.

**The main aim** of the research is to develop an effective photovoltaic system and design an inexpensive microelectric solar power plant with specified parameters and technical characteristics for further experimental studies.

**The methods.** When calculating and studying the main operation modes and structural elements of photovoltaic systems, the authors have used the results of numerous scientific studies, including applied research, and available experience in the field of solar energy, which was obtained in the performance of some theoretical and experimental work. DipTrace and EasyEDA systems were used in development and modeling of electronic circuits.

**The results.** The authors substantiate the expediency of application of more simple methods to determine the probable or actual exposure with the use of the software PVsyst, with an error of no more than 10 %. They developed the technology for experimental production of photovoltaic modules of given geometric dimensions and nominal power and the reliable control system for a biaxial solar tracker due to the actuators, which increases the efficiency of photovoltaic systems in the latitudes of Western and South-Western Siberia. A block diagram for controlling a micro-power solar power plant and electronic circuits of the MPPT solar controller, DC-DC Converter, DC-AC inverter, and the main control unit based on the ATmega326 microcontroller were designed.

### Key words:

Renewable energy sources, solar power plants, autonomous power supply system, photovoltaic module, solar cell, solar controller, tracker, actuator.

### REFERENCES

- Makarov A.A., Veselov F.V., Makarova A.S., Novikova T.V., Pankrushina T.G. Strategic prospects of the electric power industry of Russia. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 11, pp. 817–828. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0040601517110064> (accessed 11 January 2019).
- Cherepovitsyn A., Tcvetkov P. Overview of the prospects for developing a renewable energy in Russia. *Proc. of 2017 International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2017*. pp. 113–118. DOI: 10.1109/ICGEA.2017.7925466
- Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on renewable sources: Prospects for the world and for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 1 November 2016, vol. 86, Iss. 6, pp. 433–440.
- IRENA (2018). *Renewable capacity statistics 2018*, International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. URL: <https://ru.scribd.com/document/382990659/IRENA-RE-Capacity-Statistics-2018> (10.01.2019).
- IRENA (2016). *The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025*. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_Power\\_to\\_Change\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf) (дата обращения 10.01.2019).
- Ustinov D.A., Baburin S.V. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 7, pp. 5267–5270.
- Lund H., Østergaard P.A., Connolly D., Ridjan I., Mathiesen B.V., Hvelplund F., Thellufsen J.Z., Sorknes P. Energy storage and smart energy systems. *Int. J. Sustainable Energy Plann. Manage*, 2016 vol. 11, pp. 3–14. Available at: <https://doi.org/10.5278/ijsep.2016.11.2> (accessed 11 January 2019).
- Mathiesen B.V., Lund H., Connolly D., Wenzel H., Østergaard P.A., Möller B., Nielsen S., Ridjan I., Karnøe P., Sperling K., Hvelplund F.K. Smart energy systems for coherent 100 % renewable energy and transport solutions. *Appl. Energy*, 2015, vol. 145, pp. 139–154. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075> (accessed 11 January 2019).
- Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang, Y., Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. *Sustainability*, 2018, vol. 10, no. 3, 847. Available at: <https://doi.org/10.3390/su10030847> (accessed 11 January 2019).
- Abramovich B.N., Prochorova V.B., Sychev Yu.A. The Application of Modern Information Technologies for Power Monitoring and Control in Conditions of Distributed Generation. *Proc. of the 16<sup>th</sup> conference of FRUCT association*. Oulu, Finland 27–31 October, 2014. pp. 3–8. DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938.

11. Ferroni F., Hopkirk R.J. Energy Return on Energy Invested (EROI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy*, 2016, vol. 94, pp. 336–344.
12. Raugei M., Sgouridis S., Murphy D., Fthenakis V., Frischknecht R., Breyer Ch., Bardi U., Barnhart Ch., Buckley A., Carbajales-Dale M., Csala D., De Wild-Scholten M., Heath G., Jæger-Waldau A., Jones Ch., Keller A., Leccisi E., Mancarella P., Pearsall N., Siegel A., Sinke W., Stolz Ph. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for Photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: a comprehensive response. *Energy Policy*, 2017, vol. 102, pp. 377–384.
13. Ferroni F., Guekos A., Hopkirk R.J. Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy*, 2017, vol. 107, pp. 498–505. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.007> (accessed 11 January 2019).
14. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar radiation based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37. In Rus.
15. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays using long-term series FM 12 Synop and METAR in system energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88. In Rus.
16. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. In Rus.
17. Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 49–55. In Rus.
18. Hoffmann F.M., Molz R.F., Kothe J.V., Nara E.O.B., Tedesco L.P.C. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 2018, vol. 115, pp. 750–759. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.079.
19. Carvalho D.R., Lacerda Filho A.F., Resende R.C., Possi M.A., Kruckeberg J.P. An economical, two axes solar tracking system for implementation in Brazil. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, vol. 29, no. 1, pp. 123–128. DOI: 10.13031/2013.42525.
20. Lazaroiu G.C., Longo M., Roscia M., Pagano M. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 92, pp. 143–148. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.046.
21. Tharamuttam J.K., Ng A.K. Design and Development of an Automatic Solar Tracker. *Energy Procedia*, 2017, vol. 143, pp. 629–634.
22. Zhang Q.-X., Yu H.-Y., Zhang Q.-Y., Zhang Z.-Y., Shao C.-H., Yang D. A solar automatic tracking system that generates power for lighting greenhouses. *Energies*, 2015, vol. 8, no. 7, pp. 7367–7380. DOI: 10.3390/en8077367.
23. Morón C., Ferrández D., Sai, P., Vega G., Diaz J.P. New prototype of photovoltaic solar tracker based on Arduino. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 9, art. no. 1298. DOI: 10.3390/en10091298.
24. Skouri S., Ben Haj Ali A., Bouadila S., Ben Salah M., Ben Nasrallah S. Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1419–1429. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.006.
25. Oh S.J., Burhan M., Ng K.C., Kim Y., Chun W. Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39, no. 7, pp. 965–976. DOI: 10.1002/er.3306.
26. Fathabadi H. Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers. *Solar Energy*, 2016, vol. 138, pp. 67–76. DOI: 10.1016/j.solener.2016.09.009.
27. Algarin C.R., Castro A.O., Naranjo J.C. Dual-Axis Solar Tracker for Using in Photovoltaic Systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 137–145.
28. Yilmaz S., Ozcalik H., Dogmus O., Dincer F., Akgol O., Karaaslan M. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, March 2015, vol. 43, pp. 997–1005.
29. Vieira R., Guerra F., Vale M., Araújo M. Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, October 2016, vol. 64, pp. 672–681.
30. Gross K.A., Krauinsh P.Ya., Krauinsh D.P., Kukhta M.S., Sokolov A.P. Energy efficiency of movable and immobile constructions of solar panels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 113–122. In Rus.
31. Mitrofanov S.V., Nemaltsev A.Yu., Baykasenov D.K. Primary Testing of Automated Dual-Axis Solar Tracker in the Climatic Conditions of the Orenburg Region as the Prospects for the Establishment of a Hardware-Software Complex. *Alternative energy and ecology*, 2018, no. 7–9 (255–257), pp. 43–54. In Rus.
32. Dixon R.C., Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G., Ruskin V.A., Semenov S.M. Issues of linearization of a two-phase boost DC-DC converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 89–99. In Rus.
33. Mikhailchenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter. *17<sup>th</sup> International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices*. Erlagol, Russia, 2016. pp. 507–511.
34. Mikhailchenko G., Mikhailchenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, Russia, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
35. Osipov A.V., Zapolskiy S.A. Boost type resonant LCL-T converter for autonomous power supply system from renewable sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 77–88. In Rus.
36. Osipov A.V., Yaroslavtsev E.V., Burkin E.Yu., Sviridov V.V. Boost type series resonant converter with flexible structure for power supplies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 27–37. In Rus.
37. Mikhailchenko S.G., Russkin V.A., Semenov S.M., Orlyanskiy I.P., Halász S. Construction of adaptive algorithm of power extreme control in solar energy system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 102–112. In Rus.
38. Russkin V.A., Semenov S.M., Dixon R.C. Study of algorithms for tracking maximum power point for boost DC-DC converter of solar inverter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 78–87. In Rus.
39. Macaulay J., Zhou Z. A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 6. DOI: 10.3390/en11061340.
40. Al-Majidi S.D., Abbod M.F., Al-Raweshidy H.S. A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 31, pp. 14158–14171.
41. Kumar N., Hussain I., Singh B., Panigrahi B.K. Framework of Maximum Power Extraction from Solar PV Panel Using Self Predictive Perturb and Observe Algorithm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 895–903. DOI: 10.1109/TSSTE.2017.2764266.
42. Manickam C., Raman G.P., Raman G.R., Ganesan S.I., Chilakapati N. Fireworks enriched P&O algorithm for GMPPT and detec-

- tion of partial shading in PV systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4432–4443. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2604279.
43. Ahmed J., Salam Z. An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*, 2015, vol. 150, pp. 97–108. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.006.
44. Baraskar S., Jain S.K., Padhy P.K. Fuzzy logic assisted P and O based improved MPPT for photovoltaic systems. *International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems, ICETEESES 2016*. Article no. 7581369, pp. 250–255. DOI: 10.1109/ICETEESES.2016.7581369.
45. Yuksek G., Mete A.N. A hybrid variable step size MPPT method based on P&O and INC methods. *2017 10<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2017*. 2018 January, pp. 949–953.
46. Harrag A., Messalti S. Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, Article no. 4432, pp. 1247–1260. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.003.
47. Jusoh A., Alik R., Guan T.K., Sutikno T. MPPT for PV system based on variable step size P & O algorithm. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 79–92. DOI: 10.12928/telkomnika.v15i1.3160.
48. Elyaqouti M., Hakim S., Farhat S., Bouhouch L., Ihlal A. Implementation in arduino of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 434–443.

Received: 15 January 2019.

#### Information about the authors

**Stanislav O. Khomutov**, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

**Vladimir I. Polishchuk**, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

**Vasily I. Stashko**, Cand. Sc., associate professor, Polzunov Altai State Technical University.