

УДК 621.31:629.78

## АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ ПЕРВИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Донцов Олег Анатольевич<sup>1</sup>,  
badzed\_bz@mail.ru

Иванчура Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
ivan43ura@yandex.ru

Краснобаев Юрий Вадимович<sup>1</sup>,  
uvkras@mail.ru

Пост Сергей Сергеевич<sup>1</sup>,  
serseric@mail.ru

<sup>1</sup> Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корп. УЛК.

Разнородные и однородные источники энергии, обладающие различными характеристиками, повсеместно используются в автономных системах электропитания. В качестве источников энергии в наземных автономных системах электропитания в основном служат возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая, геотермальная и гидроэнергия. Комбинация разнородных источников энергии в составе автономной системы электропитания позволяет снизить зависимость требуемой генерируемой мощности от изменяющихся внешних условий. Согласование первичных источников энергии с различными характеристиками и условиями работы в рамках одной системы электропитания приводит к возникновению дополнительных сложностей, связанных с регулированием мощности источников, что и определяет актуальность рассматриваемых задач.

**Цель исследования:** разработка способов объединения первичных источников энергии с различными характеристиками и условиями работы в единую автономную систему электропитания и алгоритмов управления контроллерами этих источников.

**Задачи:** создание имитационной модели системы электропитания в среде MATLAB/Simulink; разработка и проверка алгоритма управления контроллерами первичных источников, обеспечивающего поддержание желаемого тока заряда аккумуляторной батареи системы электропитания; разработка и проверка алгоритмов управления контроллерами первичных источников, обеспечивающих отбор максимальной мощности от каждого из нескольких первичных источников, в том числе и с минимизацией времени поиска точки максимальной мощности.

**Методы исследования:** имитационное моделирование системы электропитания с использованием языка Simulink, входящего в состав программного пакета MATLAB 7.9.

**Результаты.** Разработана имитационная модель системы электропитания, включающая два источника энергии с различными характеристиками. При избытке мощности, генерируемой первичным источником энергии, контроллер источника энергии находится в режиме заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током. При дефиците мощности первичного источника контроллер функционирует в режиме поиска экстремальной мощности. Структура системы электропитания позволяет управлять двумя источниками энергии независимо друг от друга. Таким образом, контроллеры источников энергии могут находиться в различных режимах работы, обеспечивая повышенную гибкость системы электропитания. Использование алгоритма управления на нечеткой логике увеличивает скорость поиска точки максимальной мощности, а также повышает точность работы алгоритма. Проведенные с использованием разработанной модели испытания подтвердили работоспособность алгоритмов управления контроллеров солнечной батареи во всех режимах работы. Подтверждена работоспособность алгоритма выбора режима работы контроллеров в различных условиях. Предложенные алгоритмы позволяют осуществлять эффективное регулирование мощности первичных источников энергии в зависимости от различных условий работы автономной системы электропитания.

### Ключевые слова:

Автономная система электропитания, солнечная батарея, контроллер солнечной батареи, имитационная модель, аккумуляторная батарея, экстремальное регулирование.

### Введение

Разнородные и однородные источники энергии, обладающие различными характеристиками, повсеместно используются в автономных системах электропитания (СЭП). В качестве источников энергии в наземных автономных СЭП в основном служат возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая, геотермальная и гидроэнергия [1–5]. Применение различных комбинаций разнородных источников энергии позволяет снизить зависимость потребителя от изме-

няющихся внешних условий, влияющих на выход полезной мощности автономной СЭП [2, 4]. Первичными источниками (ПИ) энергии в системах электропитания космического базирования в основном являются солнечные батареи (СБ) [6–9]. Согласование первичных источников энергии с различными характеристиками и условиями работы в рамках одной системы электропитания приводит к возникновению дополнительных сложностей, связанных с регулированием мощности ПИ.

### Постановка задачи

Автономные системы электропитания постоянного тока включают в себя непосредственно первичные источники энергии, аккумуляторную батарею (АБ), кабельную сеть и контроллеры ПИ, выполненные в виде конверторов с устройствами управления.

В настоящей работе рассматриваются алгоритмы функционирования и устройство контроллеров СБ в составе автономной системы электропитания с солнечными батареями в качестве первичных источников энергии. Алгоритм функционирования контроллера СБ должен обеспечивать заряд АБ постоянным током заданной величины, а также дозаряд АБ снижающимся током при поддержании некоторого заданного фиксированного напряжения на АБ в случае, когда текущая мощность СБ превышает суммарную мощность, потребляемую нагрузкой и АБ. В случае, когда текущая мощность СБ меньше суммарной мощности, потребляемой нагрузкой и АБ, контроллер СБ работает в режиме поиска экстремальной мощности и обеспечивает отбор максимальной мощности от СБ.

В состав СЭП микроспутников и малых космических аппаратов (КА), как правило, входят несколько секций солнечных батарей, расположенных на каждой стороне космического аппарата [6–8]. Следовательно секции СБ такого КА находятся в различных условиях освещения и вносят различный вклад в суммарную мощность СЭП. При этом секции СБ могут обладать различными характеристиками, а максимальная мощность, которую может генерировать каждая секция СБ, зависит не только от индивидуальных характеристик секции, но и от ориентации секции на Солнце.

При параллельном включении нескольких СБ с различными характеристиками на общую нагрузку с использованием общего преобразователя напряжения [6, 7] положение рабочих точек на мощностной характеристике каждого источника энергии не может регулироваться в отдельности, так как контроллер СБ в таком случае будет обеспечивать регулирование положения рабочей точки на результирующей мощностной характеристике параллельно соединенных СБ. В режиме отбора экстремальной мощности это приводит к снижению суммарной мощности, отдаваемой СБ в нагрузку. Таким образом, появляется необходимость применения индивидуальных контроллеров СБ, что может обеспечить регулирование положения рабочих точек на мощностных характеристиках СБ независимо друг от друга.

Современное развитие микроконтроллерной техники позволяет уменьшить размеры управляющего устройства и реализовать управление контроллером СБ на основе микроконтроллера [10]. При этом появляется возможность реализовать не только пошаговый алгоритм поиска экстремума мощности СБ [11–13], но и более сложные алгоритмы, позволяющие ускорить процесс поиска эк-

стремума и повысить уровень мощности, генерируемой СБ за счет снижения амплитуды колебаний рабочей точки на вольтамперной характеристике СБ в окрестности точки максимальной мощности [14, 15]. Ускорение процесса поиска экстремума особенно актуально для режима «закрутки» КА, при котором происходит вращение КА вокруг своей оси с некоторой угловой скоростью [7, 8]. Решения по реализации системы электропитания с несколькими источниками энергии, а также алгоритмы управления контроллеров СБ и рассматриваются в настоящей статье.

### Решение задачи

При решении задачи регулирования мощности каждого первичного источника в отдельности воспользуемся структурной схемой автономной СЭП, приведенной на рис. 1.

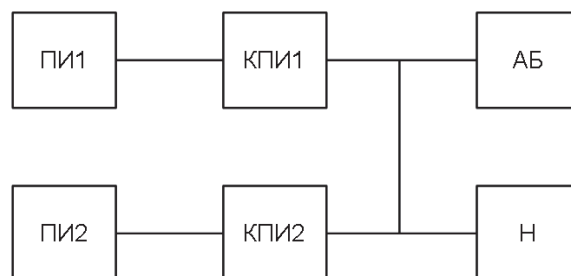


Рис. 1. Структурная схема автономной системы электропитания с двумя первичными источниками энергии

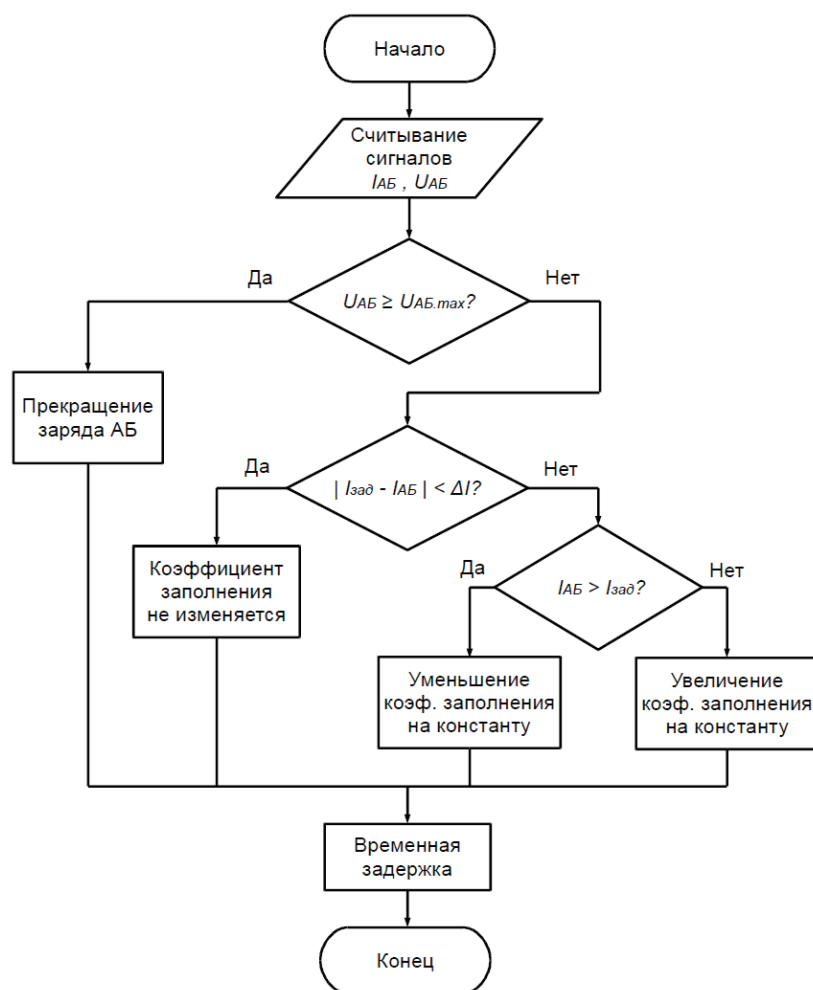
Fig. 1. Block diagram of autonomous power supply system with two primary energy sources

В соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1, источники энергии ПИ1 и ПИ2 подключаются последовательно к контроллерам КПИ1 и КПИ2. Выходные клеммы контроллеров КПИ1 и КПИ2 подключаются к аккумуляторной батарее (АБ) и нагрузке Н. Таким образом, появляется возможность реализовать независимое управление источниками энергии и обеспечить работу следующих режимов работы контроллеров:

- режим заряда АБ постоянным током заданной фиксированной величины;
- режим поиска экстремальной мощности солнечной батареи.

При избытке мощности первичного источника и необходимости заряда АБ контроллер СБ осуществляет заряд аккумуляторной батареи постоянным током заданной фиксированной величины  $I_{AB,опт}$ , при условии ограничения напряжения  $U_{AB}$  на АБ. На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током.

Согласно алгоритму, контроллер СБ считывает сигналы напряжения и тока АБ, после чего выполняется проверка условия достижения напряжения на АБ своего максимального значения. Если это условие соблюдается, то контроллер СБ отключает аккумуляторную батарею от источника энергии. Если условие не соблюдается, то происходит про-



**Рис. 2.** Алгоритм работы режима заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током

**Fig. 2.** Flowchart of the algorithm of specified fixed current battery charging mode

верка равенства текущего значения тока и заданного значения оптимального тока заряда. Если текущее значение тока находится в некотором заданном интервале, то есть равно оптимальному зарядному току с некоторой погрешностью, то коэффициент заполнения управляющих импульсов остается неизменным. Если ток заряда меньше заданного с учетом погрешности, то происходит увеличение коэффициента заполнения импульсов на некоторую величину, в противном случае происходит его уменьшение. Величина изменения коэффициента заполнения импульсов за один шаг работы алгоритма задается программно и не изменяется в процессе работы алгоритма.

В случае дефицита мощности первичного источника контроллер СБ осуществляет отбор экстремальной мощности солнечной батареи, функционировав в соответствии с разработанным алгоритмом поиска экстремальной мощности. В режиме поиска экстремальной мощности рабочей точки на мощностной характеристике СБ совершает колебания в окрестности точки максимальной мощности. При этом часть мощности СБ, превышаю-

щая мощность, потребляемую нагрузкой, поступает на заряд АБ. На рис. 3 приведена блок-схема пошагового алгоритма работы контроллера в режиме поиска экстремальной мощности [14].

В режиме поиска экстремальной мощности контроллер считывает сигналы тока и напряжения СБ, а затем перемножает их. Если замер сигналов проводится в первый раз, то текущая мощность определяется как мощность, полученная от СБ на предыдущем шаге. Далее происходит увеличение коэффициента заполнения импульсов управления на некоторую величину  $k$ , определяемую регулятором на основе нечеткой логики, затем снова производится вычисление текущей мощности СБ. Если мощность увеличилась по сравнению с запомненной на предыдущем шаге, то происходит дальнейшее увеличение коэффициента заполнения. В случае, когда измеренная мощность уменьшается, происходит изменение направления движения рабочей точки по мощностной характеристике СБ, а следовательно, и уменьшение коэффициента заполнения импульсов управления.

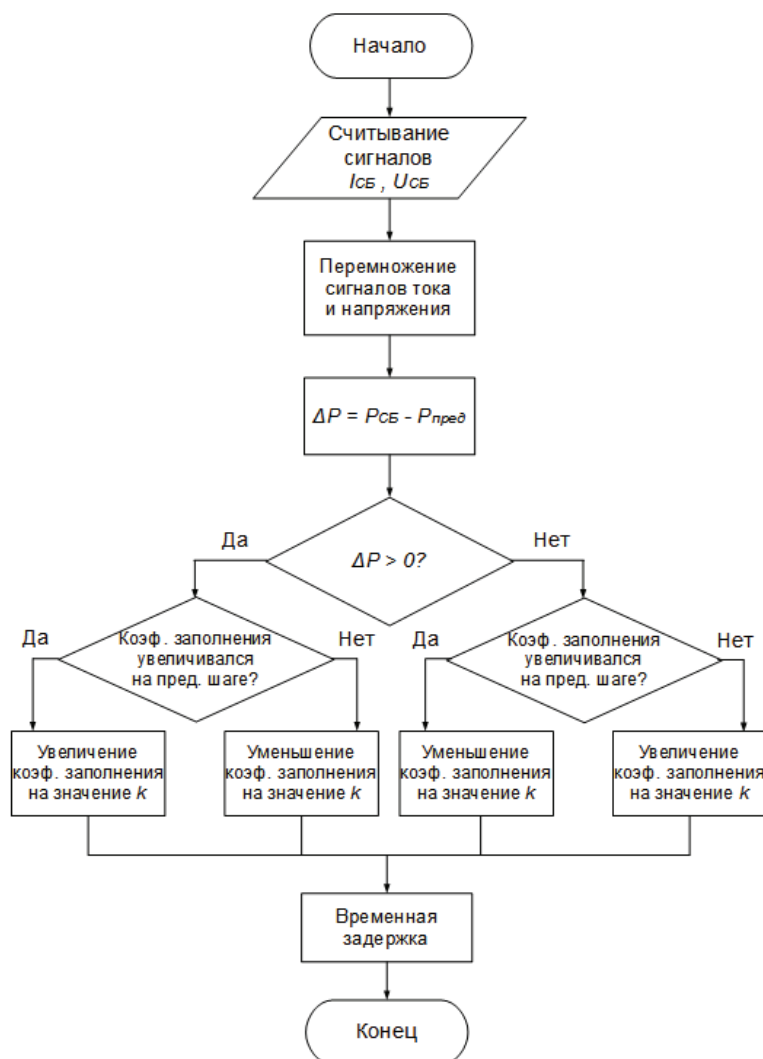


Рис. 3. Алгоритм работы режима поиска экстремальной мощности

Fig. 3. Flowchart of maximum power point tracking algorithm

Значение шага  $k$  в режиме поиска экстремальной мощности вычисляется блоком управления на нечеткой логике [16–18], входными переменными которого являются производная мощности по напряжению  $dP/dV$  за один шаг поиска экстремальной мощности, а также абсолютное изменение мощности  $dP$  за этот шаг. Нечеткие термы значений шага  $k$  в зависимости от значений термов входных переменных регулятора приведены в таблице.

Выбор текущих режимов работы контроллеров СБ определяется блоком выбора режимов (БВР). Блок-схема алгоритма работы БВР функционирования контроллеров СБ приведена на рис. 4.

Блок выбора режимов на каждом шаге работы определяет контроллер СБ с наибольшим значением текущей мощности. В случае, если контроллер СБ с наибольшим значением мощности функционирует в режиме заряда АБ фиксированным током, а текущее значение зарядного тока  $I_{АБ}$  меньше заданного  $I_{АБ,опт}$ , этот контроллер переводится в ре-

жим поиска экстремальной мощности. Выбор контроллера СБ с наибольшим значением мощности обусловлен потенциально наибольшим ростом отдаваемого источником в нагрузку и на заряд АБ тока после перевода его в режим поиска экстремальной мощности. Это позволяет сократить время на переключение режимов работы других контроллеров СБ в случае, когда перевод одного контроллера в режим поиска экстремальной мощности позволяет добиться заданного значения зарядного тока  $I_{АБ,опт}$ . Если контроллеры функционируют в режиме поиска экстремальной мощности, а значение зарядного тока  $I_{АБ}$  все еще меньше заданного  $I_{АБ,опт}$ , режим работы контроллера не изменяется, так как в этом случае обеспечить дальнейший рост передаваемой от источников мощности не является возможным. В случае, когда контроллеры СБ функционируют в режиме поиска экстремальной мощности, а значение зарядного тока  $I_{АБ}$  превышает заданное значение  $I_{АБ,опт}$ , все контроллеры СБ перево-

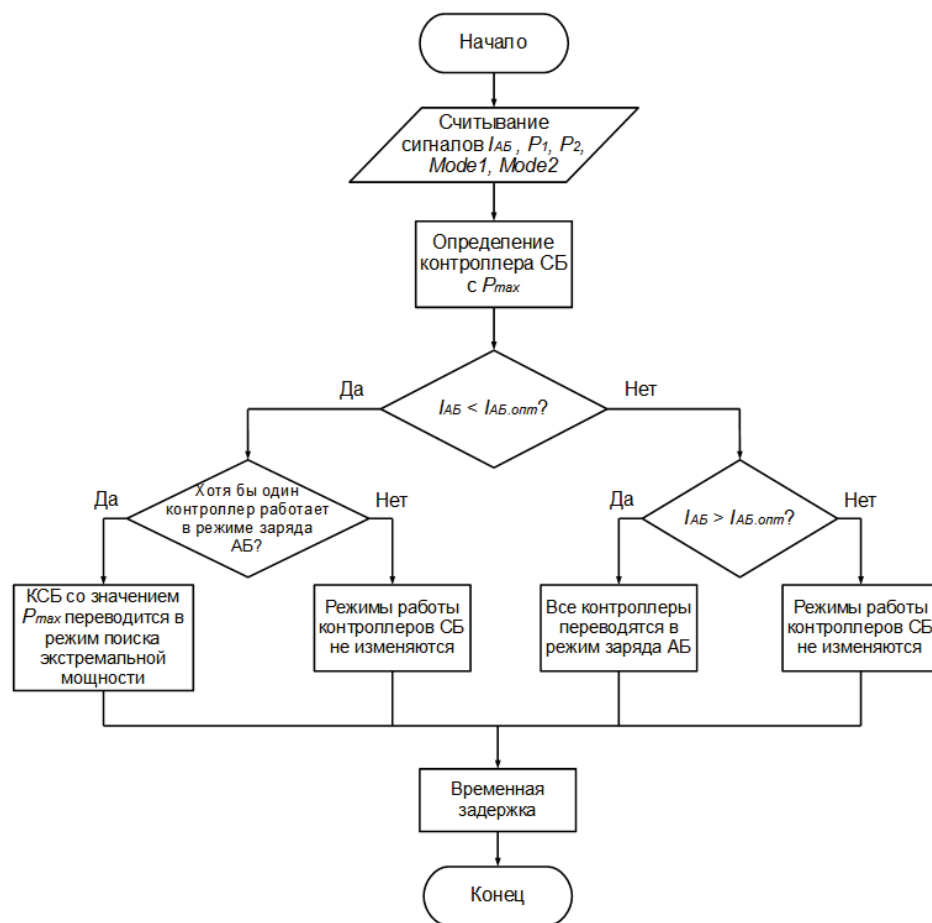


Рис. 4. Алгоритм работы блока выбора режимов функционирования контроллеров СБ

Fig. 4. Flowchart of algorithm of solar controller operation modes selection

Таблица. Значения термов шага  $k$  в режиме поиска экстремальной мощности

Table. Values of  $k$  step terms in the maximum power point tracking mode

| $dP/dV$                                           | NL (Negative large)<br>Большое отрицательное | NS (Negative small)<br>Малое отрицательное | NZ (Near zero)<br>Близкое к нулю | PS (Positive small)<br>Малое положительное | PL (Positive large)<br>Большое положительное |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| NL (Negative large)<br>Большое отрицательное      | Наивысшее<br>Highest                         | Высокое<br>High                            | Среднее<br>Moderate              | Высокое<br>High                            | Наивысшее<br>Highest                         |
| NM (Negative moderate)<br>Умеренное отрицательное | Высокое<br>High                              | Среднее<br>Moderate                        | Низкое<br>Low                    | Среднее<br>Moderate                        | Высокое<br>High                              |
| NS (Negative small)<br>Малое отрицательное        | Среднее<br>Moderate                          | Низкое<br>Low                              | Наименьшее<br>Lowest             | Низкое<br>Low                              | Среднее<br>Moderate                          |
| NZ (Near zero)<br>Близкое к нулю                  | Низкое<br>Low                                | Наименьшее<br>Lowest                       | Наименьшее<br>Lowest             | Наименьшее<br>Lowest                       | Низкое<br>Low                                |
| PS (Positive small)<br>Малое положительное        | Среднее<br>Moderate                          | Низкое<br>Low                              | Наименьшее<br>Lowest             | Низкое<br>Low                              | Среднее<br>Moderate                          |
| PM (Positive moderate)<br>Умеренное положительное | Высокое<br>High                              | Среднее<br>Moderate                        | Низкое<br>Low                    | Среднее<br>Moderate                        | Высокое<br>High                              |
| PL (Positive large)<br>Большое положительное      | Наивысшее<br>Highest                         | Высокое<br>High                            | Среднее<br>Moderate              | Высокое<br>High                            | Наивысшее<br>Highest                         |

дятся в режим заряда АБ фиксированным током. Каждый цикл работы блока выбора режимов заканчивается временной задержкой, необходимой для завершения переходных процессов после изменения режима работы контроллера СБ.

Для проверки предложенных алгоритмов управления была разработана имитационная модель системы электропитания в среде *MATLAB/Simulink*, представленная на рис. 5.

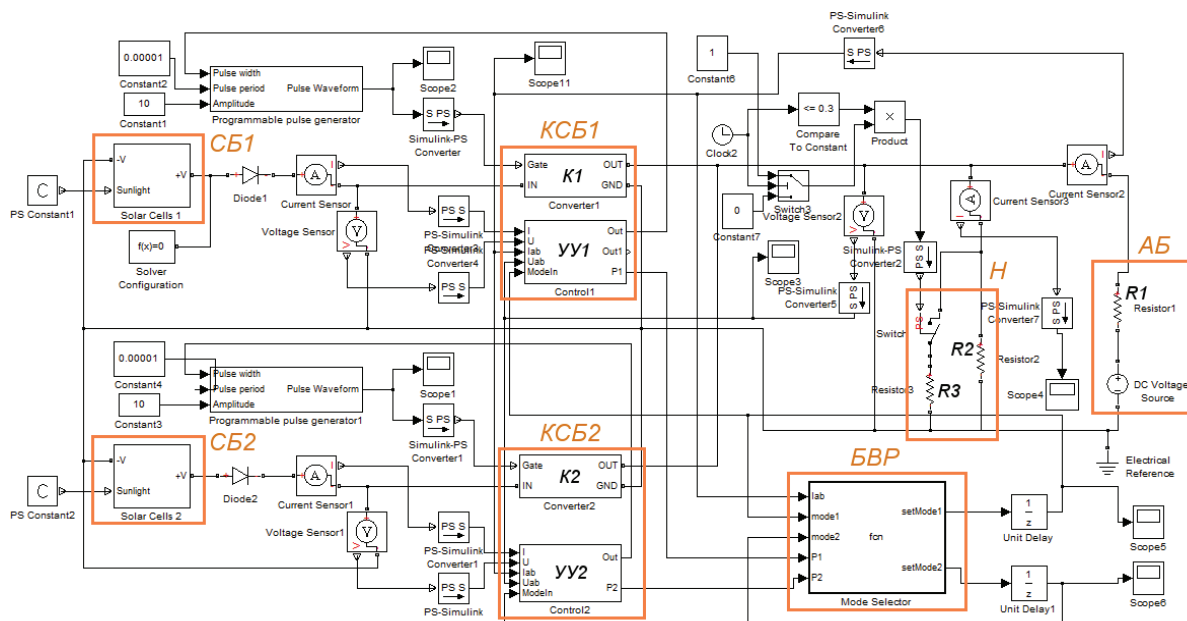


Рис. 5. Имитационная модель системы электропитания с двумя первичными источниками

Fig. 5. Simulation model of the power supply system with two primary energy sources

Имитационная модель системы электропитания содержит два первичных источника энергии, представленных солнечными батареями (Solar Cells) *CB1* и *CB2*, представляющими собой несколько последовательно включенных солнечных элементов из библиотеки компонентов *Simscape* [19]. *CB1* и *CB2* подключены к контроллерам *CB* *KCB1* и *KCB2*, работающим на общую нагрузку *H* в виде резисторов *R2* и *R3* и аккумуляторную батарею *AB* с внутренним сопротивлением *R1*. Контроллеры *CB* состоят из устройств управления (Control) *YU1* и *YU2* вместе с конвертерами напряжения (Converter) *K1* и *K2* и представляют собой функциональные блоки, алгоритмы функционирования которых выполнены в соответствии с алгоритмами управления, приведенными на рис. 2, 3. Конвертеры *K1* и *K2*, входящие в состав контроллеров *KCB1* и *KCB2*, выполнены в соответствии со схемой понижающего преобразователя напряжения [6, 11–14]. *BBP* является функциональным блоком, который содержит m-код в качестве встроенной функции для среды *Simulink* [20]. На вход блока выбора режимов поступают сигналы о текущем режиме работы каждого контроллера, текущие значения мощности каждого источника энергии, а также текущее значение тока  $I_{AB}$  аккумуляторной батареи. Алгоритм функционирования *BBP* выполнен в соответствии с приведенной на рис. 4 блок-схемой.

Сравнительный анализ работы алгоритмов поиска экстремальной мощности с фиксированным и переменным шагом приведен на рис. 6.

В результате анализа временных диаграмм работы алгоритмов поиска экстремальной мощности было установлено, что использование переменного

шага в алгоритме поиска экстремальной мощности на основе нечеткой логики увеличивает скорость поиска точки максимальной мощности на 50,8 %. Разработанный с использованием средств нечеткой логики алгоритм поиска экстремальной мощности с переменным шагом также уменьшает недоиспользование мощности *CB*, вызванное колебаниями рабочей точки относительно точки максимума мощности *CB*, на 2,8 %.

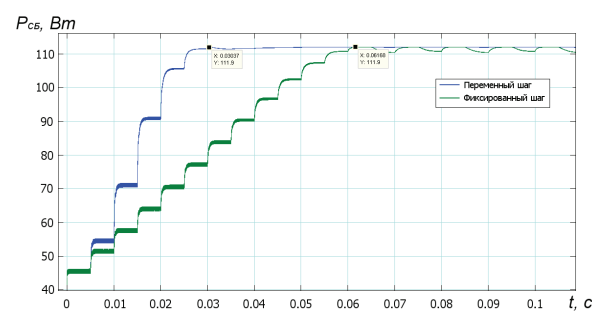
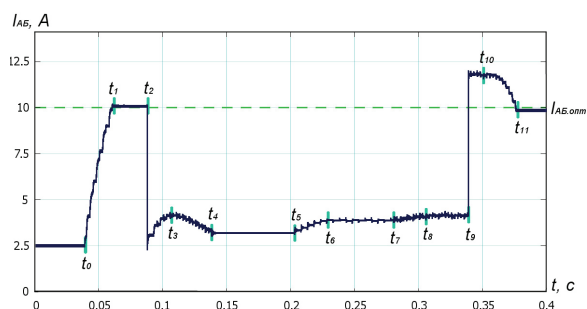


Рис. 6. Временные диаграммы мощности  $P_{CB}$  солнечной батареи в режиме поиска экстремальной мощности

Fig. 6. Change in solar panel power in the maximum power point tracking mode

На рис. 7 приведена временная диаграмма тока  $I_{AB}$  аккумуляторной батареи, поясняющая процесс изменения режимов работы контроллеров *CB*.

В интервал времени от  $t=0$  до  $t_0$  контроллеры системы электропитания не изменяют коэффициента заполнения управляющих импульсов конвертеров и ток  $I_{AB}$  заряда *AB* остается неизменным. В момент времени  $t_0$  оба контроллера системы электропитания переводятся в режим заряда *AB* заданным фиксированным током. В это время про-



**Рис. 7.** Временная диаграмма тока  $I_{AB}$  аккумуляторной батареи в процессе переключения режимов работы контроллеров СБ

**Fig. 7.** Change in battery current in the process of solar controllers modes switching

исходит постепенное увеличение коэффициента заполнения управляющих импульсов, что приводит к росту тока  $I_{AB}$  вплоть до значения оптимального тока заряда  $I_{AB,opt}=10$  А. В момент времени  $t_1$  процесс увеличения коэффициента заполнения импульсов заканчивается, так как значение зарядного тока  $I_{AB}$  становится равным  $I_{AB,opt}$  с некоторой заданной погрешностью. В момент времени  $t_2$  происходит подключение дополнительной нагрузки, что приводит к ступенчатому увеличению тока нагрузки и снижению зарядного тока  $I_{AB}$ , после чего контроллер начинает процесс увеличения коэффициента заполнения импульсов с целью достижения зарядным током заданного оптимального значения  $I_{AB,opt}$ . В момент времени  $t_3$  рабочие точки на характеристиках солнечных батарей СБ1 и СБ2 находятся в окрестностях точки максимума мощности, но контроллеры, в соответствии с алгоритмом управления, продолжают процесс увеличения коэффициента заполнения импульсов управления вплоть до момента времени  $t_4$ , когда достигается максимальное значение коэффициента заполнения. Так как оптимальное значение зарядного тока  $I_{AB,opt}=10$  А не было достигнуто в процессе работы алгоритма режима заряда АБ, в момент времени  $t_5$  контроллер СБ с самым высоким значением текущей мощности (в данном случае СБ1) переключается в режим поиска экстремальной мощности и рабочая точка на мощностной характеристике СБ1 начинает движение в сторону точки максимальной мощности солнечной батареи. К моменту времени  $t_6$  рабочая точка на мощностной характеристике СБ1 достигает окрестности точки максимальной мощности, что, однако, не приводит к достижению зарядным током  $I_{AB}$  заданного оптимального значения  $I_{AB,opt}$ . Далее, в момент времени  $t_7$ , контроллер СБ с меньшим значением текущей мощности (СБ2) переключается в режим поиска экстремальной мощности и рабочая точка на мощностной характеристике СБ2 начинает движение в сторону точки максимальной мощности.

К моменту времени  $t_8$  рабочая точка на мощностной характеристике СБ2 достигает окрестности точки максимальной мощности. В момент времени  $t_9$  происходит отключение дополнительной нагрузки, что приводит к ступенчатому уменьшению тока нагрузки и увеличению зарядного тока  $I_{AB}$ . В момент времени  $t_{10}$  блок выбора режима в соответствии с алгоритмом работы переключает оба контроллера в режим заряда АБ фиксированным током, после чего начинается процесс уменьшения коэффициента заполнения импульсов с целью достижения зарядным током заданного оптимального значения  $I_{AB,opt}$ . К моменту времени  $t_{11}$  ток заряда  $I_{AB}$  аккумуляторной батареи вновь достигает своего оптимального значения  $I_{AB,opt}=10$  А с некоторой заданной погрешностью.

### Заключение

1. При наличии в составе автономной системы электропитания нескольких источников электрической энергии, включая и накопители энергии, возникают задачи их согласованной совместной работы с целью их эффективного использования, в частности задача максимального отбора энергии от возобновляемых источников энергии.
2. Разработана имитационная модель системы электропитания, включающая два источника энергии с различными характеристиками. При избытке мощности, генерируемой первичным источником энергии, контроллер источника энергии находится в режиме заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током. При дефиците мощности первичного источника контроллер функционирует в режиме поиска экстремальной мощности. Структура системы электропитания позволяет управлять двумя источниками энергии независимо друг от друга. Таким образом, контроллеры источников энергии могут находиться в различных режимах работы, обеспечивая повышенную гибкость системы электропитания. Использование алгоритма управления на нечеткой логике увеличивает скорость поиска точки максимальной мощности, а также повышает точность работы алгоритма.
3. Проведенные с использованием разработанной модели испытания подтвердили работоспособность алгоритмов управления контроллеров солнечной батареи во всех режимах работы. Подтверждена работоспособность алгоритма выбора режима работы контроллеров в различных условиях. Предложенные алгоритмы позволяют осуществлять эффективное регулирование мощности первичных источников энергии в зависимости от различных условий работы автономной системы электропитания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carr G. Alternative energy will no longer be alternative. The Economist. URL: <http://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands> (дата обращения: 12.04.2016).
2. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2012. URL: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN\\_FD\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf) (дата обращения: 12.04.2016).
3. Trends 2013 in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2012. URL: [http://helapco.gr/pdf/IEA\\_PVPS\\_Trends\\_Report\\_2013\\_v1\\_0\\_01.pdf](http://helapco.gr/pdf/IEA_PVPS_Trends_Report_2013_v1_0_01.pdf) (дата обращения: 12.04.2016).
4. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100 с.
5. International Renewable Energy Agency: Vision and Mission. URL: <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=cat&PriMenuID=13&CatID=9> (дата обращения: 12.04.2016).
6. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.
7. Spacecraft Systems Engineering. 4<sup>th</sup> ed. / Eds. P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 724 p.
8. Norton C., Pellegrino S., Johnson M. Small Satellites: a Revolution in Space Science. 2014, July. URL: <http://www.kiss.caltech.edu/study/smallsat/KISS-SmallSat-FinalReport.pdf> (дата обращения: 12.04.2016).
9. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение. URL: <http://jurnal.vniem.ru/text/102/2.pdf> (дата обращения: 24.04.2016).
10. Развитие микропроцессорной техники. Структура и режимы современных микропроцессоров. URL: [http://life-prog.ru/view\\_articles.php?id=334](http://life-prog.ru/view_articles.php?id=334) (дата обращения: 24.04.2016).
11. Донцов О.А. Использование экстремального регулятора в автономных системах электропитания. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/thesis/s006/s006-040.pdf> (дата обращения: 12.04.2016).
12. Контроллер солнечной батареи с экстремальным регулированием / В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев, О.А. Донцов, С.С. Пост // Электромеханические преобразователи энергии: VI Междунар. науч.-техн. конф. ЭПЭ-2013. – Томск, 2013. – С. 180–185.
13. Имитационная модель контроллера солнечной батареи / С.С. Пост, О.А. Донцов, В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 114–120.
14. Dontsov O., Ivanchura V., Krasnobaev Y. A Fuzzy Logic Solar Controller with Maximum Power Point Tracking. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – V. 6 (8). – P. 786–794.
15. An Asymmetrical Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems / C. Liu, J. Chen, Y. Liu, Z. Yang // Energies. – 2014. – Iss. 7. – P. 2178–2193.
16. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. Прикладные нечеткие системы / пер. с япон.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
17. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
18. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (дата обращения: 12.04.2016).
19. Ibbini M., Mansi S. Simscape solar cells model analysis and design // Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy. – Kuala Lumpur, WSEAS Press, 2014. – P. 97–103.
20. Схемотехническое моделирование в Simscape и SimElectronics. URL: [http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2014\\_4\\_174.php](http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2014_4_174.php) (дата обращения: 12.04.2016).

Поступила 21.11.2016 г.

## Информация об авторах

**Донцов О.А.**, аспирант кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

**Иванчура В.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

**Краснобаев Ю.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

**Пост С.С.**, аспирант кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

UDC 621.31:629.78

## AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING OF PRIMARY ENERGY SOURCES

Oleg A. Dontsov<sup>1</sup>,  
badzed\_bz@mail.ru

Vladimir I. Ivanchura<sup>1</sup>,  
ivan43ura@yandex.ru

Yury V. Krasnobaev<sup>1</sup>,  
uvkras@mail.ru

Sergey S. Post<sup>1</sup>,  
serseric@mail.ru

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
26, Kirensky street, Krasnoyarsk, 660074, Russia.

*Heterogeneous and homogeneous energy sources with different characteristics are frequently used in autonomous power supply systems. The renewable energy sources such as solar, wind, geothermal and hydro energy mainly serve as primary energy sources of terrestrial autonomous power supply systems. A combination of different energy sources as a part of an autonomous power supply system allows reducing the dependence of the required generated power from unstable ambient conditions. Matching of the primary energy sources with different characteristics and operating conditions in the same power supply system leads to additional difficulties related to power control of energy sources. These difficulties determine the relevance of the study.*

**The main aim** of the study is to develop the primary energy sources combination and control techniques so that the primary energy sources with different characteristics and operating conditions could operate in the same power supply system.

**The objectives** of the study are to develop the simulation model of the power supply system using MATLAB/Simulink software; to develop and test the primary energy source controllers operation algorithms that would allow maintaining the required battery charging current and operation of the primary energy sources in the maximum power point tracking mode and minimization of the maximum power point search time.

**Methods used in the study:** the simulation of a power supply system with the use of MATLAB 7.9 Simulink software.

**Results.** The authors have developed the simulation model of a power supply system that includes two primary energy sources with different characteristics. When there is an excess of power generated by the primary energy source, its controller operates in the battery charging mode. When the primary source power shortage occurs, its controller operates in the maximum power point tracking mode. The proposed power supply system structure allows controlling two energy sources independently, thus the primary energy source controllers could operate in different modes, providing more flexibility to the power supply system. The use of fuzzy logic control algorithm increases the accuracy and search speed of the maximum power point tracking algorithm. The results of simulation confirmed the efficiency of the proposed solar controller operation algorithms in all modes stated above. The efficiency of controller operation modes selection algorithm was confirmed in different operating conditions. The proposed algorithms allow controlling effectively the primary power sources power depending on the different power supply system operating conditions.

### Key words:

Autonomous power supply system, solar cell, solar controller, simulation model, battery, maximum power point tracking.

### REFERENCES

1. Carr G. Alternative energy will no longer be alternative. *The Economist*. Available at: <http://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands> (accessed 12 April 2016).
2. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y. *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. 2012. Available at: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN\\_FD\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf) (accessed 12 April 2016).
3. *Trends 2013 in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2012*. Available at: [http://helapco.gr/pdf/IEA\\_PVPS\\_Trends\\_Report\\_2013\\_v1\\_0\\_01.pdf](http://helapco.gr/pdf/IEA_PVPS_Trends_Report_2013_v1_0_01.pdf) (accessed 12 April 2016).
4. Lukutin B.V. *Detsentralizovannye sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami* [Decentralized power supply systems with wind and solar power stations]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. 100 p.
5. *International Renewable Energy Agency: Vision and Mission*. Available at: <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=cat&PriMenuID=13&CatID=9> (accessed 13 April 2016).
6. Soustin B.P. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft power supply systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 318 p.
7. *Spacecraft Systems Engineering*. 4<sup>th</sup> ed. Eds. P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 724 p.
8. Norton C., Pellegrino S., Johnson M. *Small Satellites: A Revolution in Space Science*. 2014, July. Available at: <http://www.kiss.caltech.edu/study/smallsat/KISS-SmallSat-FinalReport.pdf> (accessed 14 April 2016).
9. Makridenko L.A., Boyarchuk K.A. *Mikrospuntniki. Tendentsiya razvitiya. Osobennosti rynka i sotsialnoe znachenie* [Microsatellites. Development trend. Market characteristics and social impact]. Available at: <http://jurnal.vniem.ru/text/102/2.pdf> (accessed 24 April 2016).
10. *Razvitie mikroprotessorovoy tekhniki. Struktura i rezhimy sovremennykh mikroprotessorov* [Development of microprocessor technology. Structure and mode of modern microprocessors]. Available at: [http://life-prog.ru/view\\_articles.php?id=334](http://life-prog.ru/view_articles.php?id=334) (accessed 24 April 2016).

11. Dontsov O.A. *Ispolzovanie ekstremalnogo regulatora v avtonomnykh sistemakh elektropitaniya* [Use of an extremum regulator in autonomous power supply systems]. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/thesis/s006/s006-040.pdf> (accessed 12 April 2016).
12. Ivanchura V.I. Kontroller solnechnoy batarei s ekstremalnym regulirovaniem [Solar cell controller with maximum power point tracking]. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii. VI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [Electromechanical energy converters. VI International research conference]. Tomsk, 9–11 October 2013. Vol. 6, pp. 180–185.
13. Post S.S. Simulation model of a solar cell controller. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 111–120. In Rus.
14. Dontsov O., Ivanchura V., Krasnobaev Yu. A Fuzzy Logic Solar Controller with Maximum Power Point Tracking. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 6 (8), pp. 786–794.
15. Liu C., Chen J., Liu Y., Yang Z. An Asymmetrical Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Energies*, 2014, vol. 7, pp. 2178–2193.
16. Asai K. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied fuzzy systems]. Translated from Japanese. Moscow, Mir Publ., 1993. 368 p.
17. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy systems simulation in MATLAB and fuzzyTECH software]. Saint-Petersburg, BKV-Petersburg Publ., 2005. 736 p.
18. Shtovba S.D. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuyu logiku* [Introduction to fuzzy set theory and fuzzy logic]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (accessed 12 April 2016).
19. Ibbini M. Simscape solar cells model analysis and design. *Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy*. Kuala Lumpur, WSEAS Press, 2014. pp. 97–103.
20. *Skhemotekhnicheskoe modelirovanie v Simscape i SimElectronics* [Schematic simulation in the Simscape and SimElectronics software]. Available at: [http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2014\\_4\\_174.php](http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2014_4_174.php) (accessed 11 April 2016).

Received: 21 November 2016.

#### Information about the authors

**Oleg A. Dontsov**, postgraduate student, Siberian Federal University.

**Vladimir I. Ivanchura**, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.

**Yury V. Krasnobaev**, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.

**Sergey S. Post**, postgraduate student, Siberian Federal University.