

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ¹

© 2022 г. Я. А. Меньшиков^а, А. Б. Тарасенко^а, М. Ж. Сулейманов^а, *

^аОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, корп. 2, Москва, 125412 Россия

*e-mail: smusi@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

После доработки 26.04.2022 г.

Принята к публикации 28.04.2022 г.

Описаны новый способ и устройство автоматического управления зарядом аккумуляторной батареи (АКБ) для автономного источника питания с функцией экстремального регулирования мощности солнечной батареи (СБ) (MPPT-контроллер). Контроллер предназначен для заряда литий-ионных аккумуляторных батарей и может использоваться для работы как с литий-железосиликатными аккумуляторами (LiFePO_4 , 3.2 В), так и с литий-ионными (NiCoMnO , 3.7 В). Контроллер построен на базе высокочастотного импульсного понижающего преобразователя с синхронным выпрямлением. Отличительные особенности контроллера — выравнивание напряжения на секциях аккумуляторной батареи и управление ее нагревателем перед ее зарядом. Этот предварительный прогрев АКБ позволяет отказаться от тяжелых и недолговечных свинцовых аккумуляторов и перейти к использованию надежных, малогабаритных и высокоресурсных литий-ионных аккумуляторных батарей, в том числе в условиях низких температур, при которых применение последних затруднено или невозможно из-за снижения емкости. Важная особенность разработанного контроллера — питание его собственных нужд от солнечной батареи, а не только от аккумуляторной, как это предусмотрено в абсолютном большинстве имеющихся на рынке контроллеров, что расширяет области его практического использования. Контроллер имеет необходимый комплекс защит: от подключения солнечной батареи обратной полярностью, перезаряда и глубокого разряда аккумуляторной батареи, переохлаждения или перегрева АКБ, перегрузки по току нагрузки. Рабочий диапазон напряжения на солнечной батарее варьируется от 15 до 45 В. Максимальный ток заряда аккумуляторной батареи, как и отдаваемый в нагрузку максимальный ток, составляет 20 А. Весь функционал реализован на печатной плате с односторонним монтажом электронных компонентов. Выполнен комплекс экспериментальных исследований режимов работы устройства, подтвердивший работоспособность заложенных алгоритмов управления. Предлагаемый контроллер может быть использован в различных областях деятельности, в частности для питания удаленного телекоммуникационного оборудования, камер видеонаблюдения правонарушений, в сельском хозяйстве, в первую очередь в животноводстве, в сфере туризма и т.д.

Ключевые слова: контроллер заряда, экстремальный регулятор мощности, солнечная батарея, фотоэлектрический преобразователь, имитатор солнечной батареи, аккумулятор, понижающий преобразователь

DOI: 10.56304/S0040363622110066

Для ряда потребителей, часто находящихся вне покрытия сети центрального электроснабжения (например, туристов, геологов, животноводов, сотрудников экстренных служб), возникает потребность в портативном источнике электроэнергии, способном обеспечить работу целевых устройств небольшой мощности (до 200 Вт). Один из эффективных вариантов получения электрической энергии в полевых условиях — использование фотоэлектрических преобразовате-

лей (солнечных батарей). Однако при чрезвычайной простоте конструкции, отсутствии подвижных частей и малой массе для обеспечения работы СБ с максимальной эффективностью необходимо постоянно контролировать отдаваемую ею электрическую мощность, обеспечивая поиск точки максимальной мощности СБ при текущих погодных условиях путем постоянного изменения тока в ней. Кроме того, солнечные батареи имеют существенный недостаток — непостоянство выдаваемой мощности, которая может изменяться от нуля до паспортных пиковых значений (и даже несколько превышать их) в зависимости

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 075-01056-22-00).

от времени суток, погодных условий, а также окружающей температуры, облачности и т.п.

Для гарантированного обеспечения питанием целевых устройств в схему автономного источника должен быть включен накопитель энергии — аккумуляторная батарея, питающая целевое устройство в ночное время или в пасмурную погоду. Кроме того, АКБ покрывает пики нагрузки со стороны целевого устройства, когда потребляемая мощность превышает мощность, отдаваемую солнечной батареей. Лучшим выбором для автономного портативного источника электроэнергии являются литий-ионные аккумуляторы, обладающие высокой надежностью и имеющие значительный циклический ресурс и наибольшую среди доступных на рынке АКБ удельную плотность энергии. Высокое значение последней позволяет сделать автономный источник максимально легким и компактным при заданной энергоемкости накопителя, что крайне важно для применения в качестве портативного источника питания. Существенные недостатки литий-ионных аккумуляторов — ограниченный температурный диапазон, при котором их возможно безопасно заряжать, особенно в области низких (отрицательных) температур, и чувствительность к перезаряду и переразряду литий-ионных элементов. Глубокий разряд литий-ионных элементов может привести к быстрой потере емкости и преждевременному выходу элементов из строя, а перезаряд стать причиной возгорания и взрыва.

Один из ключевых элементов автономного источника — специализированный контроллер заряда (СКЗ) — это электронная схема, объединяющая СБ, АКБ и другие элементы источника в единую систему. Специализированный контроллер заряда необходим для отбора энергии от солнечной батареи в точке максимальной мощности, обеспечения заданных режимов заряда АКБ, слежения за ее состоянием и уровнем заряда, работы с целевой нагрузкой.

Существует множество вариантов конструкций контроллеров заряда с различными топологией передачи энергии от СБ в АКБ и целевую нагрузку и реализацией алгоритмов поиска точки максимальной мощности СБ [1–18]. Однако общая черта описанных в этих статьях и докладах устройств — работа с АКБ как с моноблоком, для которого необходимо обеспечить заданные режимы заряда, что справедливо в основном для свинцово-кислотных аккумуляторов. При использовании литий-ионных АКБ требуется дополнительная система поэлементного контроля напряжений и защиты АКБ (BMS), а температурный диапазон применения системы в целом ограничен диапазоном рабочих температур используемой АКБ. При этом в присутствующих на рынке отечественных и зарубежных устройствах возможно организо-

вать связь между контроллером и BMS литий-ионной аккумуляторной батареи (для осуществления отключения системы по перезаряду, т.е. при превышении допустимого напряжения на элементе, и глубокому разряду элементов АКБ по сигналу от BMS), однако в этом случае пользователь должен приобрести контроллер и BMS конкретного, рекомендованного производителя [19]. Это гарантирует согласованную работу программного обеспечения обоих устройств, однако резко ограничивает пользователя в выборе ключевых компонентов системы.

Говоря о присутствующих на российском рынке контроллерах, следует отметить одну общую черту — все они адаптированы для работы в системе, обязательно включающей в себя аккумуляторную батарею. Это справедливо как для серийных отечественных контроллеров КЭС от МАП “Энергия” [20], так и для широкой линейки китайских контроллеров EP Solar Tracer [21]. Питание собственных нужд таких устройств осуществляется только от аккумуляторной батареи, и при ее глубоком разряде или отсутствии в системе контроллер оказывается неработоспособен даже при наличии солнечной энергии. Это означает, что в случае глубокого разряда, сильного охлаждения аккумуляторной батареи или нецелесообразности использования ее в системе (например, когда конечным продуктом является не электроэнергия, а тепло, холод или очищенная вода) такие изделия использованы быть не могут. Единственным исключением до недавнего времени было устройство Solar Kerberos, предназначенное для систем солнечного горячего водоснабжения [22], однако для него питание собственных нужд было организовано от централизованной сети переменного тока, питающей нагреватель воды параллельно с СБ, что также ограничивает возможности автономного применения Solar Kerberos.

Далее описаны результаты разработки и испытаний усовершенствованного контроллера заряда, который при реализации стандартных функций для устройств подобного класса имеет ключевые особенности:

встроенную систему контроля и выравнивания напряжения на отдельных ячейках аккумуляторной батареи;

встроенную систему управления подогревом АКБ перед ее зарядом для расширения температурного диапазона применения источника в сторону отрицательных значений;

возможность питания собственных нужд контроллера как от АКБ, так и от СБ, что существенно расширяет область применения контроллера.

ОПИСАНИЕ КОНТРОЛЛЕРА

Контроллер реализован на единой печатной плате и выполняет следующие функции:

понижает напряжения от солнечной батареи до текущего значения на АКБ и обеспечивает заряд последней с отбором энергии от СБ в точке максимальной мощности;

осуществляет предварительный прогрев аккумуляторной батареи перед выполнением заряда, если ее температура становится ниже допустимой (для прогрева АКБ используется энергия, поступающая от солнечной батареи, при этом во время подогрева отбор энергии от СБ производится в точке максимальной мощности);

обеспечивает подключение целевого устройства (нагрузки) к выходу контроллера, только если аккумуляторная батарея имеет достаточный для этого уровень заряда, и отключает целевое устройство от АКБ, когда ее уровень заряда снижается до заданного минимального значения (в целях защиты АКБ от глубокого разряда);

осуществляет контроль напряжения на элементах АКБ и управляет работой аварийных защит, если напряжение хотя бы на одном элементе АКБ выйдет за пределы заданного рабочего диапазона;

обеспечивает выравнивание (балансировку) напряжения на элементах АКБ;

реализует необходимый комплекс защит источника от подключения СБ обратной полярностью, перезаряда, переразряда, перегрева или переохлаждения АКБ, а также от перегрузки по току нагрузки.

Специализированный контроллер заряда рассчитан на работу с АКБ, состоящей из четырех последовательных секций аккумуляторных элементов — на 3.7 В (литий-ионные элементы состава $\text{LiC}_6/\text{LiNiCoMnO}$) либо на 3.2 В (железо-фосфатные элементы состава $\text{LiC}_6/\text{LiFePO}_4$).

Основные характеристики СКЗ представлены далее:

Рабочий диапазон напряжения, В:

на АКБ.....10–17

на СБ.....15–17

Максимальный ток, А:

заряда АКБ.....20

отдаваемый в нагреватель АКБ.....20

нагрузки (целевого устройства).....20

Эффективность поиска точки максимальной мощности СБ и передачи энергии

от СБ в АКБ, %.....Более 93

Габариты платы СКЗ

(длина × ширина × высота), мм.....93 × 79 × 8.5

Масса, кг.....0.71

Основные преимущества разработанного контроллера заряда — возможность прогрева АКБ перед зарядом, встроенная система контроля батареи, высокие удельные характеристики, небольшие габариты, малая масса и, вместе с тем, высокая эффективность и низкая стоимость. Структурная схема СКЗ представлена на рис. 1.

Главный элемент СКЗ — импульсный высокочастотный понижающий преобразователь с синхронным выпрямлением (SBC). С его помощью осуществляются регулирование тока, отбираемого от солнечной батареи, и регулирование выдаваемой СБ мощности с поиском ее максимума в текущих условиях освещенности. Силовые транзисторы преобразователя управляются посредством специализированного драйвера (DRV).

Другое важное звено СКЗ — схема контроля и выравнивания напряжения на ячейках АКБ (BMS). Выравнивание производится путем принудительного разряда секций, напряжение на которых превышает заданный порог (см. далее). Разряд осуществляется на разрядные резисторы R1–R4.

Транзисторный ключ S_{PV} , совмещенный с диодом, необходим для защиты контроллера от подключения СБ обратной полярностью. Когда полярность СБ правильная, S_{PV} шунтирует диод, уменьшая потери энергии при прямом падении напряжения на диоде.

Транзисторный ключ S_{DC} используется для перенаправления энергии от СБ либо на АКБ (и нагрузку), либо на нагреватель АКБ, при этом исключается возможность работы нагревателя от аккумуляторной батареи.

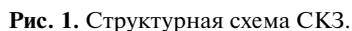
Целевое устройство, или полезная нагрузка (LOAD), подключается к выходу контроллера с помощью транзисторного ключа S_{LD} , который используется для защиты АКБ от переразряда, а контроллера — от чрезмерного тока нагрузки.

Сборка АКБ содержит четыре последовательные секции аккумуляторных ячеек, снабженные нагревательным элементом (HTR) и датчиком температуры АКБ (Т). Для включения и отключения нагревателя АКБ применяется транзисторный ключ S_H .

Напряжение на СБ контролируется датчиком U_{PV} , на выходе из понижающего преобразователя — U_{DC} , на АКБ — U_B . Датчики U_1 , U_2 и U_3 контролируют напряжения на секциях АКБ. Датчик I_{DC} измеряет ток на выходе из понижающего преобразователя, а I_{LD} — ток, потребляемый целевым устройством (нагрузкой).

Управление контроллером осуществляет микроконтроллер ATMEGA644 [23], питание различных узлов производится от СБ или АКБ через схему питания собственных нужд (IPS).

Кроме того, в схеме контроллера предусмотрен интерфейс RS-485, необходимый для настройки



PVCC – схемотехническое обозначение всей платы контроллера для использования в документации на портативный источник; DRV – драйвер; PV – солнечная батарея (Photovoltaic); SBC – импульсный высокочастотный понижающий преобразователь с синхронным выпрямлением; BMS – система поэлементного контроля напряжений и защиты АКБ; LOAD – целевая нагрузка; IPS – схема питания собственных нужд; ST485 – микросхема-драйвер; ATMEGA644 – микроконтроллер; BP – аккумуляторная батарея в сборе с нагревателем и датчиком температуры (Battery Pack); HTP – нагреватель (Heater); R1–R4 – разрядные резисторы; V1–V3 – промежуточные точки между секциями АКБ; B1–B4 – аккумуляторные элементы (секции параллельно соединенных аккумуляторных элементов); V – вольтметр; A – амперметр; T – датчик температуры; А и В – сигнальные выходы для интерфейса RS-485; А, В – условные “плюс” и “минус”; точки Р, Н, L, В, Т (со знаками “плюс” и “минус” – полярность) – точки подключения внешних компонентов источника питания к плате контроллера

том высоты компонентов не превышает 9 мм. Обратная сторона платы плоская, не содержит выступающих частей. Для отведения тепла плата прикрепляется с помощью теплопроводящего клея на радиатор или стенку корпуса автономного источника. Внешний вид СКЗ показан на рис. 2. Для сравнения параметры СКЗ и доступных в России аналогов [21] представлены в таблице.

Конструктивно СКЗ смонтирован на печатной плате размером 79×93 мм, имеющей односторонний монтаж компонентов. Ее толщина с уче-

Параметры СКЗ и доступных в России аналогов

Контроллер	Объем, см ³	Масса, кг	Цена, руб.
SR-MC_2420N10	1071	0.70	5969
SR-ML2420	1903	1.40	7071
VENUS-M2420	1890	2.00	5941
CK3*	425	0.46	3700**

* С радиатором и корпусом в исполнении для крепления на монтажную панель.

**** При изготовлении на территории России в объемах производства от 1000 шт./мес.**

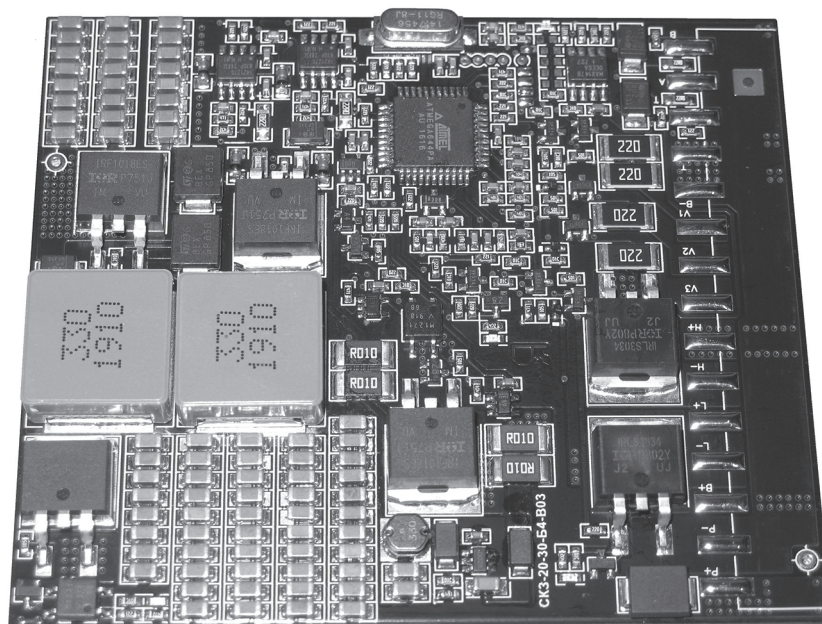


Рис. 2. Внешний вид СКЗ

Для испытания разработанного СКЗ при работе с реальной АКБ авторами статьи был изготовлен макет портативного автономного источника питания для применения в сфере туризма. Аккумуляторная батарея портативного источника смонтирована из 120 аккумуляторных элементов NCR18650B производства Panasonic [24] по схеме 30P4S — четыре последовательные секции по 30 параллельно соединенных элементов в каждой. Номинальное напряжение батареи 14,4 В, максимальное зарядное — 16,8 В, минимальное в конце разряда 12 В, емкость 90 А · ч. Нагреватель АКБ изготовлен в виде двух односторонних печатных плат, наклеенных с помощью теплопроводящего клея снизу и сверху АКБ. В качестве тепловыделяющих элементов используются медные печатные проводники заданных сечения и длины, выполненные на поверхности печатных плат нагревателей. Датчик температуры АКБ (терморезистор) размещен в центре АКБ в зазоре между аккумуляторными ячейками.

Аккумуляторная батарея с установленными платами нагревателей представлена на рис. 3. Вырезы в платах предназначены для подключения проводов к выводам АКБ (В+ и В–, см. рис. 1), отвода проводов от промежуточных точек между секциями АКБ (линии V1–V3), а также для подключения проводов к датчику температуры. Собранный АКБ установлена в легкий герметичный алюминиевый корпус. Для фиксирования аккумуляторной батареи внутри корпуса, а также ее теплоизоляции от окружающей среды использована монтажная пена. В этом же корпусе смонтирован СКЗ.

Работа СКЗ определяется следующими основными параметрами:

Порог, В:

срабатывания защиты	
по переразряду секций АКБ.....	3
отключения защиты	
по переразряду секций АКБ.....	3.1
отключения нагрузки по разряду	
секций АКБ.....	3.3
подключения нагрузки	
после восстановления	
заряда секций АКБ.....	3.5
включения балансировочных	
резисторов.....	4.1
отпускания защиты по перезаряду	
секций АКБ.....	4.25
срабатывания защиты по перезаряду	
секций АКБ.....	4.35

Напряжение заряда секций АКБ, В.....4.2

Порог, °С:

температуры ограничения заряда	
АКБ по переохлаждению.....	0
защиты АКБ по перегреву.....	60
Температура окончания прогрева АКБ, °С.....	5

Специализированный контроллер заряда работает следующим образом. При поступлении от СБ напряжения, которое превышает текущее напряжение на АКБ более чем на 2 В, в работу за-

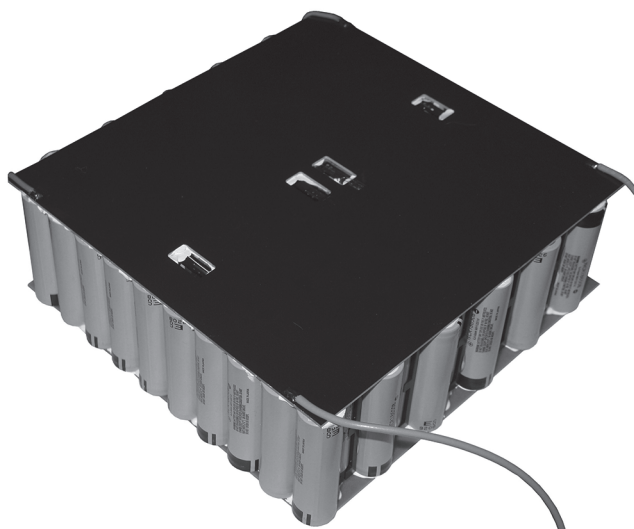


Рис. 3. Аккумуляторная батарея портативного автономного источника с платами нагревателей и датчиком температуры

пускается понижающий преобразователь SBC (см. рис. 1). Во время работы преобразователя ключ S_{PV} замыкается для снижения потерь энергии на диоде и увеличения эффективности.

Если температура АКБ превышает 0°C , включается транзисторный ключ S_{DC} и энергия от СБ поступает на АКБ, приводя к ее заряду. Ключ подключения нагревателя S_H остается разомкнут. Если температура АКБ меньше 0°C , ключ подключения нагревателя S_H будет включен, в то время как S_{DC} останется выключен. Энергия от СБ поступит в нагреватель и приведет к разогреву аккумуляторной батареи перед ее зарядом. Когда температура АКБ достигнет 5°C , ключ нагревателя S_H будет выключен (нагреватель прекратит работу), а S_{DC} — включен. Энергия от СБ начнет поступать в разогретую АКБ.

Заряд аккумуляторной батареи будет происходить до напряжения, равного четырем значениям напряжения заряда секций АКБ (т.е. до 16.8 В). Во время заряда батареи будет использоваться вся доступная мощность СБ либо зарядный ток АКБ ограничится на максимальном для контроллера уровне — 20 А. После достижения на АКБ заданного зарядного напряжения (16.8 В) дальнейший заряд АКБ будет осуществляться при постоянном напряжении.

Ключ подключения нагрузки S_L останется в замкнутом состоянии, если напряжение на всех секциях АКБ превысит 3.3 В. Если напряжение хотя бы на одной из четырех секций аккумуляторной батареи станет ниже 3.3 В, ключ S_L будет разомкнут, а целевое устройство (нагрузка) — обесточено. Повторное включение S_L нагрузки

будет выполнено, когда напряжение на всех без исключения секциях АКБ превысит 3.5 В. Если напряжение хотя бы на одной секции аккумуляторной батареи снизится до 3 В, контроллер полностью прекратит свою работу и перейдет в режим энергосбережения, предотвращая глубокий разряд АКБ. Связь через интерфейс RS-485 станет недоступной. Восстановление работоспособности контроллера произойдет в том случае, если напряжение на всех секциях АКБ превысит 3.1 В либо если будет подано достаточное напряжение от СБ. Кроме того, ключ S_L разомкнется, если ток нагрузки станет больше 22 А — это обеспечит защиту контроллера от перегрузки по току. Попытка повторного включения ключа S_L осуществляется через 1 с после отключения.

Выравнивание напряжения на секциях АКБ производится индивидуально для каждой из четырех секций. Избыточный заряд сбрасывается на разрядные резисторы R1–R4. Соответствующий резистор подключается к секции, когда напряжение на последней достигает 4.1 В.

Заряд аккумуляторной батареи будет принудительно прекращен, если напряжение хотя бы на одной ее секции достигнет 4.35 В. Возобновление заряда происходит, если на всех без исключения секциях АКБ напряжение не превышает 4.25 В.

Во время передачи энергии от СБ в АКБ или на нагреватель осуществляется непрерывный поиск точки максимальной мощности СБ. Его алгоритм базируется исключительно на показаниях датчика I_{DC} , установленного после понижающего преобразователя SBC. Фактически алгоритм ищет не точку максимальной мощности СБ, а точку максимального тока после преобразователя. С учетом характера последующей нагрузки, которая может быть либо резистивная (если задействован нагреватель), либо емкостная при псевдофиксированном напряжении (если подключена АКБ), поиск максимума тока после преобразователя эквивалентен поиску максимума мощности СБ, причем с автоматическим учетом потерь в преобразователе.

Суть алгоритма поиска точки максимального тока заключается в следующем. Изменение тока на выходе из преобразователя SBC осуществляется путем изменения скважности D высокочастотного управляющего сигнала на силовых транзисторах преобразователя. Оно может быть направлено в сторону увеличения скважности, при этом соотношение напряжения на СБ и напряжения на выходе из преобразователя уменьшается (что приводит к росту нагрузки на солнечной батарее, напряжение на ней снижается), либо в сторону уменьшения скважности, при этом соотношение входного и выходного напряжения преобразователя возрастает (СБ разгружается, напряжение на ней возрастает).

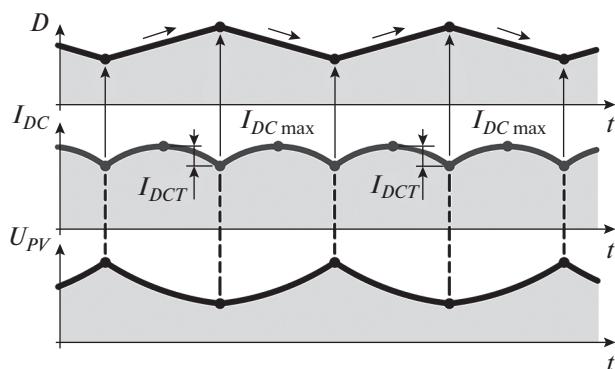


Рис. 4. Алгоритм поиска точки максимального тока. Восходящие и нисходящие стрелки на верхнем графике — направление изменения тока; вертикальные стрелки и штриховые линии — сопоставление одних и тех же моментов времени на разных графиках

Предполагается, что имеется некоторое выбранное направление поиска точки максимальной мощности, например, в сторону увеличения скважности (в сторону загрузки СБ). Периодически производится измерение тока на выходе из преобразователя I_{DC} . Если результат измерения тока I_{DC} превышает текущий найденный максимум $I_{DC \max}$, значение максимума заменяется на

I_{DC} . Кроме того, по измеренному току I_{DC} определяется пороговое значение снижения тока $I_{DCT} = I_{DC}/32$. При этом если $I_{DCT} < 0.1$ А, то I_{DCT} принимают как 0.1 А. Затем результат измерения тока I_{DC} сравнивается с текущим максимумом тока $I_{DC \max}$. Если $I_{DC} < (I_{DC \max} - I_{DCT})$, направление поиска точки максимальной мощности изменяется на противоположное (в конкретном примере — в сторону уменьшения скважности или в сторону разгрузки СБ), а текущее значение тока I_{DC} сохраняется как максимальное ($I_{DC \max}$).

Таким образом, нормальная работа алгоритма поиска точки максимального тока сопровождается непрерывными колебаниям I_{DC} с амплитудой не менее 0.1 А, при этом направление поиска точки максимального тока периодически изменяется (рис. 4).

Для настройки параметров специализированного контроллера заряда, наблюдения за его работой в реальном времени, а также сбора статистических данных о работе СКЗ авторами разработано специализированное программное приложение MPPTVIEWER (рис. 5). Приложение имеет наглядную визуализацию текущего состояния СКЗ, индикацию всех параметров контроллера. Область построения графиков позволяет отслеживать изменение параметров во времени для различных

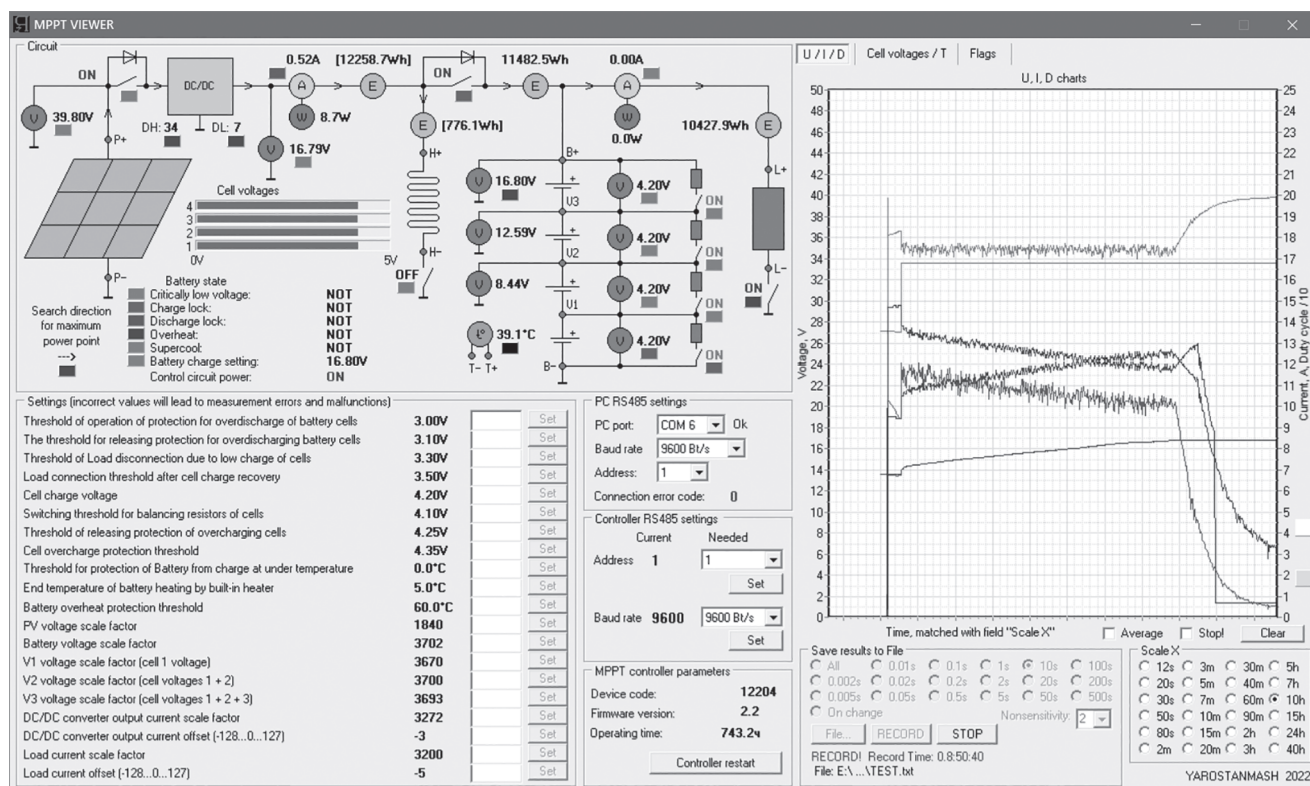


Рис. 5. Приложение MPPTVIEWER

временных интервалов. Возможность записи текущих значений параметров в лог-файл помогает накапливать статистические данные о работе контроллера для их последующей обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тестирование разработанного СКЗ осуществлялось в лабораторных условиях с использованием имитатора солнечной батареи. Благодаря имитатору можно было исключить влияние погодных условий в ходе испытаний, а также заранее узнать оптимальные значения напряжения и тока имитируемой СБ, к которым должен стремиться СКЗ. Схема имитатора приведена на рис. 6, его вольт-амперная характеристика — на рис. 7. Напряжение холостого хода имитатора составляло 40 В, ток короткого замыкания — 6.33 А, напряжение U , ток I и мощность P в точке максимальной мощности были равны 35 В, 5.17 А и 181 Вт соответственно.

Перед испытаниями датчики напряжения и тока СКЗ были откалиброваны по образцовым

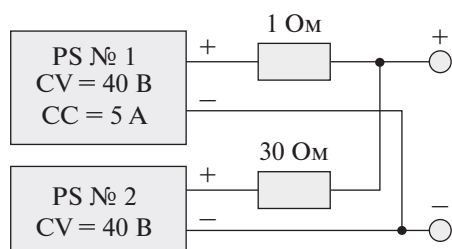


Рис. 6. Схема имитатора солнечной батареи. PS — лабораторный блок питания (power supply); режим ограничения: CV — напряжения (constant voltage); CC — тока (constant current limitation)

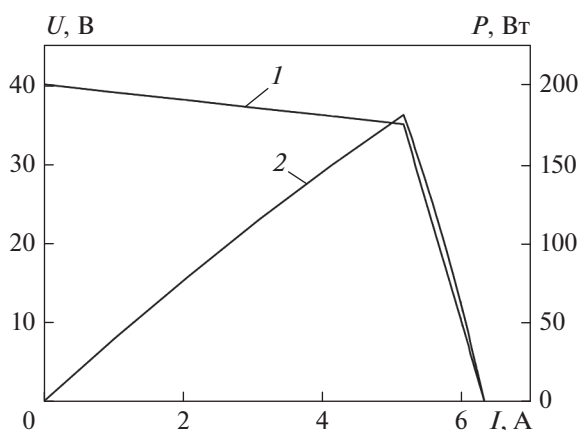


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика (1) и кривая мощности (2) имитатора СБ

приборам с погрешностью не более 1% от максимальных значений диапазонов измерений данных приборов. Аккумуляторная батарея источника была полностью разряжена до срабатывания защитного отключения по низкому уровню заряда (3.3 В). Затем основной блок портативного автономного источника, содержащий АКБ и СКЗ, был заморожен до температуры -18°C и после этого подключен к имитатору СБ. Параметры контроллера в ходе испытаний фиксировались приложением MPRTVIEWER в лог-файл для последующей обработки [25].

Тестирование СКЗ проводили на экспериментальной установке, внешний вид которой показан на рис. 8.

На первом этапе СКЗ был осуществлен прогрев АКБ до заданной температуры 5°C (температура окончания прогрева аккумуляторной батареи). Мощность, которую использовали для прогрева АКБ, ограничивалась мощностью встроенного нагревателя. Средняя мощность, которая отдавалась на нагреватель АКБ на этом этапе, составила 135 Вт (рис. 9). Энергия, потребовавшаяся на прогрев АКБ, равнялась $41 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

На втором этапе был произведен заряд аккумуляторной батареи, состоявший из двух стадий. На первой (основной) стадии в АКБ передавалась вся доступная мощность солнечной батареи. Специализированный контроллер правильно определил точку максимальной мощности имитатора СБ и осуществил заряд АКБ с использованием максимальной доступной энергии СБ. Стадия основного заряда завершилась при достижении на аккумуляторной батарее заданного напряжения 16.8 В, при этом аккумуляторная батарея приняла $1023 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ энергии. Вторая стадия (дозаряд АКБ при постоянном напряжении) проходила вплоть до падения зарядного тока через АКБ до значения менее 1 А, а АКБ приняла еще $106 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ энергии.

Время прогрева аккумуляторной батареи от -18 до 5°C составило около 19 мин, а общее время прогрева и полного заряда АКБ τ — около 8 ч, время достижения 90%-ной емкости (без учета второй стадии заряда — стадии дозаряда АКБ) — 6 ч 20 мин.

Можно заметить, что среднее напряжение на входе СБ на стадии заряда АКБ в режиме максимальной мощности составило 34.8 В, что хорошо совпадает с напряжением в точке максимальной мощности использованного имитатора СБ (35 В) и свидетельствует о высоком качестве работы созданного контроллера.

Средняя мощность, передаваемая на АКБ на стадии заряда АКБ в режиме максимальной мощности, равняется 169 Вт, что составляет 93.4% максимальной доступной мощности имитатора СБ (181 Вт). Недовыработка 6.6% включает в себя как потери энергии на элементах контроллера,

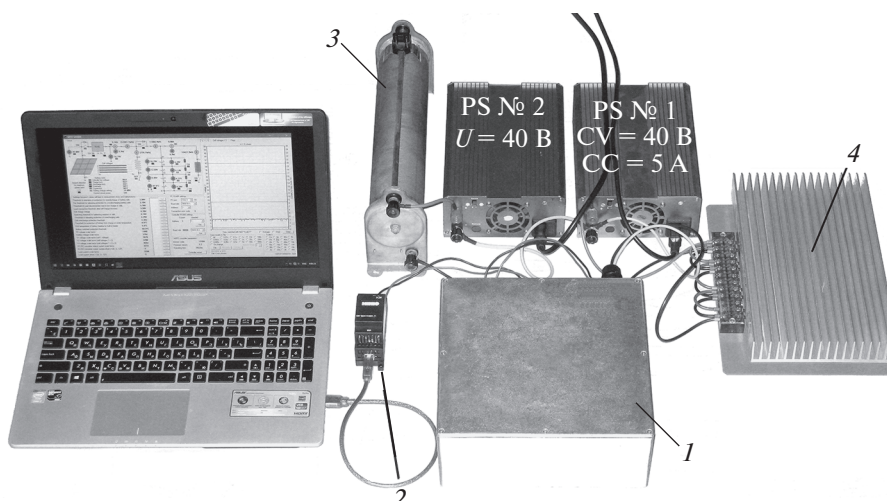


Рис. 8. Внешний вид экспериментальной установки для тестирования СКЗ.

PS – лабораторный блок питания (power supply); *U* – напряжение (voltage); *CV* – напряжение в режиме стабилизации напряжения (constant voltage); *CC* – заданное ограничение отдаваемого тока (constant current limitation). *1* – испытуемое устройство (device under test); *2* – преобразователь интерфейса USB (компьютера) в интерфейс RS-485 (разработанного контроллера) (с двусторонним обменом данными); резисторы сопротивлением, Ом: *3* – 30; *4* – 1

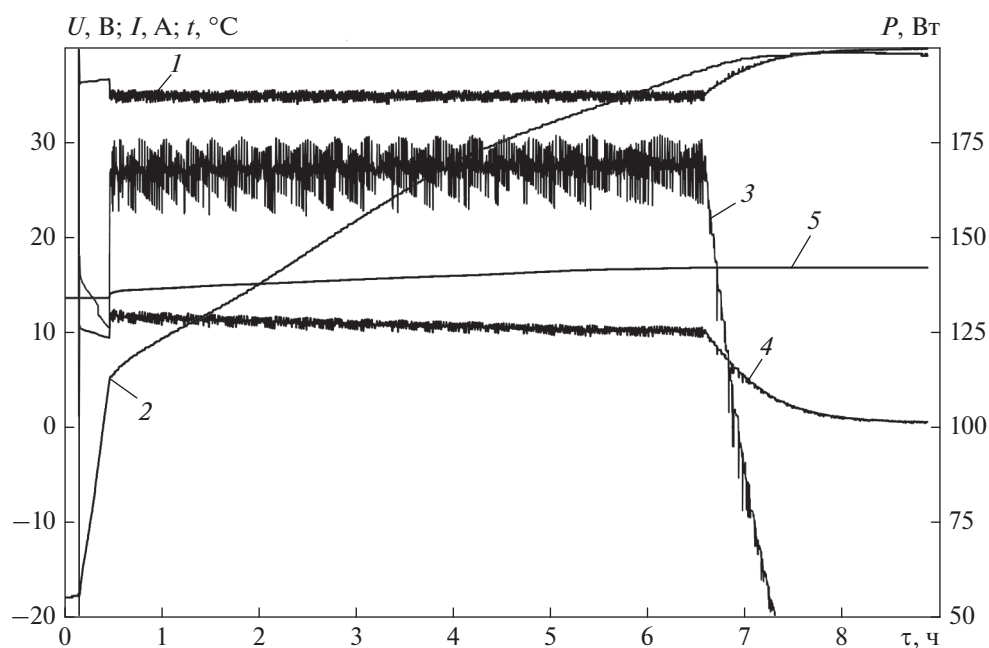


Рис. 9. Прогрев и заряд АКБ портативного источника с помощью СКЗ.

1 – напряжение на СБ (U_{PV}); *2* – температура АКБ (t_B); *3, 4* – мощность (P_{DC}) и ток (I_{DC}) на выходе из преобразователя; *5* – напряжение на АКБ (U_B)

так и неидеальность алгоритма поиска точки максимальной мощности.

Натурные испытания разработанного СКЗ полностью подтвердили заложенные на этапе проектирования характеристики. Специализированный контроллер заряда в составе макета пор-

тативного автономного источника продемонстрировал полную работоспособность схемотехнических и программных решений. В результате проделанной работы получено гибко настраиваемое современное изделие, готовое к серийному производству.

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованный солнечный контроллер заряда для автономных источников питания обеспечивает предварительный прогрев и заряд АКБ от солнечной батареи в точке максимальной мощности. Контроллер содержит также схему выравнивания напряжений на секциях АКБ и средства контроля состояния АКБ. Весь функционал реализован на единой печатной плате.

2. Настройка параметров и наблюдение за работой контроллера в реальном времени производятся с помощью специализированного приложения, имеющего наглядный интерфейс (с картинками, мнемосхемами, графиками и т.д.) и развитые возможности. Контроль за работой контроллера можно вести дистанционно (удаленно) через интерфейс RS-485.

3. Проведенные в лабораторных условиях с использованием имитатора солнечной батареи испытания разработанного контроллера показали полную его работоспособность, высокое качество алгоритма поиска точки максимальной мощности солнечной батареи и соответствие проектных и действительных характеристик.

4. Готовый к серийному производству контроллер имеет высокие удельные характеристики (значительную мощность при малых объеме и массе), небольшие габариты, высокую эффективность и низкую стоимость и может быть использован в различных системах автономного питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Solar** energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review / D. Hao, L. Qi, A.M. Tairab, A. Ahmed, A. Azam, D. Luo, Y. Pan, Z. Zhang, J. Yan // *Renewable Energy*. 2022. V. 188. P. 678–697. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.066>
2. **Prasad A.R., Natarajan E.** Optimization of integrated photovoltaic-wind power generation systems with battery storage // *Energy*. 2006. V. 31. Is. 12. P. 1943–1954. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.032>
3. **Heo J.Y., Park M.** Simulation analysis of power management techniques for a solar-powered embedded device // *Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Power and Renewable Energy (ICPRE)*. Chengdu, China, 20–23 Sept. 2017. P. 845–848. <https://doi.org/10.1109/ICPRE.2017.8390653>
4. **Obydenkova S.V., Pearce J.M.** Technical viability of mobile solar photovoltaic systems for indigenous nomadic communities in northern latitudes // *Renewable Energy*. 2016. V. 89. P. 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.036>
5. **Liu Y.-H., Huang J.-W.** A fast and low cost analog maximum power point tracking method for low power photovoltaic systems // *Sol. Energy*. 2011. V. 85. Is. 11. P. 2771–2780. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.019>
6. **De Cesare G., Caputo D., Nascetti A.** Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load // *Sol. Energy*. 2006. V. 80. Is. 8. P. 982–988. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.07.010>
7. **Vaidya V., Wilson D.** Maximum power tracking in solar cell arrays using time-based reconfiguration // *Renewable Energy*. 2013. V. 50. P. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.001>
8. **Dynamic** maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control / T. Esram, J.W. Kimball, P.T. Krein, P.L. Chapman, P. Midya // *IEEE Trans. Power Electron.* 2006. V. 21. Is. 5. P. 1282–1291. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.880242>
9. **Hammami M., Grandi G., Rudan M.** An improved MPPT algorithm based on hybrid RCC scheme for single-phase PV systems // *Proc. of the 42nd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. Florence, Italy, 23–26 Oct. 2016. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793032>
10. **Yau H.-T., Liang Q.-C., Hsieh C.-T.** Maximum power point tracking and optimal Li-ion battery charging control for photovoltaic charging system // *Comput. Mathematics Appl.* 2012. V. 64. Is. 5. P. 822–832. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.12.048>
11. **Rahul P., Saravanan S., Rameshbabu N.** Incremental conductance based MPPT for PV system using boost and SEPIC converter // *J. Eng. Appl. Sci.* 2015. V. 10. Is. 7. P. 2914–2919.
12. **An intelligent** control strategy of fractional short circuit current maximum power point tracking technique for photovoltaic applications / H.A. Sher, A.F. Murtaza, A. Noman, K.E. Addoweesh, M. Chiaberge // *J. Renewable Sustainable Energy*. 2015. V. 7. P. 013114. <https://doi.org/10.1063/1.4906982>
13. **Improved** fractional open circuit voltage MPPT methods for PV systems / D. Baimel, S. Tapuchi, Y. Levron, J. Belikov // *Electronics*. 2019. V. 8. Is. 3. P. 321. <https://doi.org/10.3390/electronics8030321>
14. **Esram T., Chapman P.L.** Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques // *IEEE Trans. Energy Convers.* 2007. V. 22. Is. 2. P. 439–449. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.880242>
15. **Comparative** study on charge pump circuits for harvesting solar energy / J.S. Song, S.-D. Byeon, S.H. Shin, S.N. Truong, H.-S. Mo, K.-S. Min // *Proc. of the Intern. Conf. on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering*. Zhengzhou, China, 11–13 April 2015. P. 992–995. <https://doi.org/10.2991/isrme-15.2015.207>
16. **Gupta A.K., Saxena R.** Review on widely-used MPPT techniques for PV applications // *Proc. of the Intern. Conf. on Innovation and Challenges in Cyber Security (ICICCS-INBUSH)*. Greater Noida, India, 3–5 Febr. 2016. P. 270–273. <https://doi.org/10.1109/ICICCS.2016.7542321>
17. **D'Souza N.S., Lopes L.A.C., Liu X.J.** An intelligent maximum power point tracker using peak current control // *PESC Record – IEEE Annual Power Electronics Specialists Conf.* Recife, Brazil, 16 June 2005.

- P. 172–177.
<https://doi.org/10.1109/PESC.2005.1581620>
18. **Shanthi T., Prabha S.U.** Neural network based MPPT controller for solar PV system // Int. J. Innovative Technol. Exploring Eng. 2018. V. 8. Is. 2. P. 300–304.
 19. **Сайт** компании SMA Solar Technology GmbH, Batteries in Sunny Island systems – List of permitted batteries. [Электрон. ресурс.] <https://www.sma.de/en/products/battery-inverters/sunny-island-44m-60h-80h.html>.
 20. **Сайт** компании МАП “Энергия”. [Электрон. ресурс.] <http://invertor.ru/scontroller.html>.
 21. **Сайт** интернет-магазина “Ваш солнечный дом”. [Электрон. ресурс.] [https://shop.solarhome.ru/solar-controller/cat-mppt/?rdrf\[man\]\[\]=37](https://shop.solarhome.ru/solar-controller/cat-mppt/?rdrf[man][]=37).
 22. **Сайт** компании Solar Kerberos. Product lines – SOLAR KERBEROS – solární ohřev vody. [Электрон. ресурс.] solar-kerberos.com.
 23. **Техническое** описание микроконтроллеров ATmega644/V. 8-bit Atmel microcontroller with 64K bytes in-system programmable flash. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2593.pdf>.
 24. **Техническое** описание аккумуляторов Panasonic NCR18650B. <https://www.yarst.org/data/3/NCR18650B.pdf>.
 25. **Лог-файл** представленных в статье лабораторных испытаний разработанного контроллера (текстовый файл результатов). <https://www.yarst.org/data/3/2022.02.11.txt> [Log file of the laboratory tests of the developed controller presented in the article (text file of results). Available at: <https://www.yarst.org/data/3/2022.02.11.txt>].

A Device for Optimal Control of an Autonomous Photovoltaic Power Supply Source: Development and Test Results

Ya. A. Men'shikov^a, A. B. Tarasenko^a, and M. Zh. Suleimanov^{a, *}

^a Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

*e-mail: smusi@mail.ru

Abstract—The article describes a new method and device for automatically controlling the charge of a storage battery (SB) for an autonomous power supply source with the function of the photovoltaic array (PVA) maximum power point tracking control (an MPPT controller). The controller is intended for charging Li-ion batteries and can be used to operate with both lithium iron phosphate (LiFePO₄, 3.2 V) and lithium-ion (NiCoMnO, 3.7 V) batteries. The controller is constructed on the basis of a high-frequency synchronous buck converter. The controller's distinctive features are that it equalizes the voltages across the storage battery sections and controls its heater prior to perform the battery charging. Owing to the SB preheating, it becomes possible to discard the use of lead storage batteries, which are heavy-weight devices with a rather short service life, and make a shift to the use of reliable, compact, and durable Li-ion batteries, also under low temperature conditions, in which the use of such batteries is difficult or even impossible in view of a drop of their energy-storage capacity. An important feature of the developed controller is that its auxiliaries take power supply from a photovoltaic array and not only from the storage battery, as is the case in the absolute majority of the commercially available controllers, due to which it has a broader field of practical applications. The controller is equipped with the necessary set of protections, including those from photovoltaic array connection in inverse polarity, from SB overcharging and deep discharge, overcooling or overheating, and load overcurrent. The operating range of voltage across the photovoltaic array varies from 15 to 45 V. The storage battery maximal charging, as well as load current, is 20 A. The entire set of controller functions has been implemented on a single-sided printed-circuit board. A set of experimental studies of the device operation modes was carried out, which has confirmed the efficiency of built-in control algorithms. The proposed controller can be used in various fields of activity, in particular, for supplying power to remote telecommunication equipment, offence recording cameras, in agriculture (primarily in livestock farming), in tourism industry, etc.

Keywords: charge controller, maximum power point tracking controller, photovoltaic array, photovoltaic converter, photovoltaic array simulator, storage battery, buck converter