

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.311.243

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЛЕРОВ ЗАРЯДА СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

© 2020 г. Н. П. Гребенчиков^а, Д. О. Варламов^а, С. М. Зуев^{а, *}, Р. А. Малеев^а,
А. А. Скворцов^а, А. П. Гребенчиков^а

^аМосковский политехнический университет,
ул. Б. Семеновская, 38, Москва, 107023 Российская Федерация

*E-mail: sergei_zuev@mail.ru

Поступила в редакцию 05.08.2019 г.

После доработки 07.11.2019 г.

Принята к публикации 20.11.2019 г.

Представлены результаты, полученные в области анализа и разработки контроллеров для заряда солнечной электростанции. Приведено описание контроллеров заряда солнечной панели, предложена схема солнечной установки с их использованием. Рассчитана точка максимальной мощности (ТММ) солнечной батареи из поликристаллического кремния. Предложено программное обеспечение на языке Pascal для исследования и анализа контроллеров заряда, которое может быть использовано для солнечных батарей разного типа, в том числе из перовскита. Показано, что контроллер, который отслеживает ТММ, обладает лучшими характеристиками, так как обеспечивает более высокий заряд.

DOI: 10.31857/S0033849420080057

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особое внимание уделяется восстанавливаемым источникам энергии, что связано с дефицитом традиционных ресурсов и экологическими проблемами. Широкое применение находят системы преобразования солнечной энергии в электрическую¹. Большинство известных производителей в области восстанавливаемой энергетики занимаются развитием собственной солнечной индустрии.

Создание и изготовление систем конвертации солнечной энергии в электроэнергию представляется многообещающим и динамично развиваемым направлением создания экологически чистых источников энергии.

В 2016 г. было выработано около 364 ГВт солнечной энергии². Мощности всемирной солнечной энергетики увеличиваются в XXI столетии со средним темпом более 50% в год. На данные темпы не оказывают большого влияния ни финансовые кризисы, ни внезапные колебания стоимости иных энергоресурсов. Несмотря на то что процент солнечной энергетики во всемирной энергопотребляющей сети не слишком

велик, однако ведущие специалисты предполагают, что через 30–40 лет она будет основным источником энергии на планете³.

В настоящее время большинство населения планеты проживает в местностях, где до сих пор имеется дефицит электроэнергии. Таким образом, возобновляемые источники энергии, к которым относятся и солнечные электростанции, являются наилучшим вариантом для использования в быту.

Преимуществом систем преобразования солнечной энергии являются минимальный уход в эксплуатации и высокая экологичность. К числу недостатков таких систем следует отнести относительно высокую себестоимость и низкий КПД [1]. Однако КПД таких систем может быть повышен с помощью эффективного контроллера солнечного заряда.

Цель данной работы — анализ и разработка контроллеров для заряда солнечной электростанции.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве экспериментальных образцов использовали солнечные батареи из поликристаллического кремния размером 545 × 668 × 28 мм, которые были размещены на открытом воздухе с прямым доступом солнечных лучей.

¹ Каталог The World's Top 4 Alternative Energy Companies. <http://www.investopedia.com/investing/top-alternative-energy-companies/>.

² Доклад Statistical Review of World Energy. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.

³ <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html>.

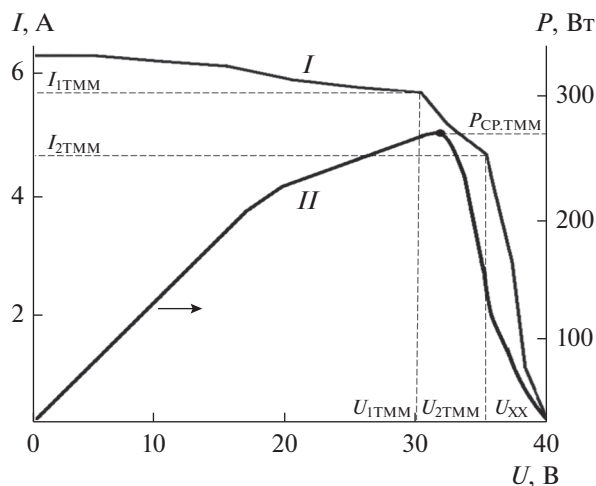


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика солнечной панели.

Для разработки принципиальной схемы предложен обзор имеющихся контроллеров для зарядки накопителей энергии от солнечных панелей. Независимо от конструкции фотопреобразователей, все они оснащены устройством, которое называется контроллером заряда солнечной панели. В схему установки входит также аккумуляторная батарея (АБ) — накопитель энергии, который заряжается от солнечной панели. Собственно, данный второстепенный источник энергии обслуживается контроллером первым [2].

Контроллер выполняет различные функции в ходе заряда/разряда АБ. Целесообразно чтобы заряд АБ происходил не напрямую, тогда можно будет контролировать процесс зарядки, обеспечивая тем самым более высокие технические показатели.

Функция контроллера состоит в регулировании мощности, исходящей от солнечной панели к АБ.

В современных контроллерах заряда используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) для постепенного снижения доли энергии, подаваемой на АБ по мере ее заряда, что обеспечивает высокий КПД и повышает срок службы АБ. При этом обеспечивается периодическая дозарядка АБ.

Наиболее перспективными являются контроллеры заряда, которые обеспечивают отслеживание точки максимальной мощности (ОТММ). Контроллеры типа ОТММ в основном трансформируют повышенное напряжение в силу тока. Такой контроллер отслеживает ток в постоянном режиме, а также напряжение на солнечной батарее, затем перемножает их значения и определяет пару ток—напряжение, при которых мощность солнечной батареи будет максимально возможной. Встроенный процессор позволяет контролировать, на какой из четырех стадий заряда — наполнение, насыщение, выравнивание или поддержка — находится аккумуля-

лятор, и на основании этих данных автоматически определяется, какой ток должен подаваться в аккумуляторы. В то же время процессор может давать команды на вывод параметров на экран, хранение данных. К недостаткам можно отнести то, что при использовании контроллера типа ОТММ теряется определенное количество энергии, но эта потеря пренебрежимо мала по сравнению с дополнительной энергией, которую обеспечивает данный контроллер [2].

В основном солнечные энергосистемы используют АБ с напряжением 12 В. Солнечные панели (СП) могут давать значительно больше напряжения, чем требуется для зарядки АБ. Поиск оптимального соотношения между выходным напряжением и током, обеспечивающим максимальное использование солнечной энергии, является одной из основных задач при использовании СП [3].

При низких напряжениях возрастают потери в проводах, но применение контроллера типа ОТММ дает возможность существенно повысить напряжения в проводах и тем самым уменьшить потери мощности. Контроллер типа ОТММ преобразует избыточное напряжение в дополнительный ток.

СП может генерировать различные напряжения в зависимости от следующих параметров:

- 1) количество солнечного света;
- 2) подключенная нагрузка;
- 3) температура СП.

При изменении времени суток и погодных условий напряжение, производимое СП, будет постоянно варьироваться. Величина тока независимо от напряжения будет определяться характеристиками конкретной СП (рис. 1).

Оптимальное соотношение между током и напряжением называется точкой максимальной мощности (ТММ), а соответствующие величины тока и напряжения обозначаются $I_{ТММ}$ и $U_{ТММ}$.

На рис. 1 линией I показано напряжение солнечной панели $U_{1ТММ} = 30$ В, соответствующее току $I_{1ТММ} = 6.2$ А, линией II — напряжение $U_{2ТММ} = 35$ В, соответствующее току $I_{2ТММ} = 5$ А. Среднее расчетное значение максимальной мощности соответствует точке $P_{ср.ТММ}$.

Режим максимальной мощности зависит от интенсивности излучения солнца [4]. Например, для расчета возьмем СП мощностью $P_{1СП} = 100$ Вт, $U_{1СП} = 18$ В при $I_{1СП} = 5.56$ А. Определим сопротивление нагрузки:

$$R_{1СП.н} = U_{1СП} / I_{1СП} = 18 / 5.56 = 3.24 \text{ Ом.}$$

При любой другой нагрузке СП будет выдавать менее 100 Вт. Так что если статическая нагрузка подключена непосредственно к панели, а ее сопротивление выше или ниже, чем внутреннее сопротивление

панелей на ТММ, то мощность, потребляемая от панели, будет меньше максимально доступной [5].

Другой пример, если присоединить СП мощностью $P_{2СП} = 100$ Вт непосредственно к свинцово-кислотной батарее $U_{2СП} = 12$ В, то напряжение на панели будет понижено вблизи напряжения нагрузки АБ, так как сопротивление АБ ниже, чем у панелей, но ток остается прежним на $I_{2СП} = 5.56$ А. Это происходит потому, что СП ведут себя как источники тока, поэтому ток определяется доступным излучением Солнца.

Определим мощность под нагрузкой:

$$P_{2СП.н} = U_{2СП} I_{2СП} = 66.72 \text{ Вт.}$$

Следовательно, СП теперь ведет себя как СП на 66 Вт.

В работах зарубежных авторов [6–10] показано, что ТММ может быть рассчитана различными методами.

Первый метод “Perturb and Observe” [6] основан на периодическом полном сканировании всей ВАХ СП (как правило, один раз в два часа). Данный метод является наиболее распространенным.

Второй метод “Scan and Hold” [7]. При первом сканировании напряжение устанавливается и запоминается напряжение, соответствующее ТММ. К числу преимуществ такого метода следует отнести высокую скорость работы и обеспечение непрерывного заряда. Однако такой метод не эффективен в условиях низкой солнечной активности.

Третий метод “Percentage of open circuit voltage” [8]. Основан на измерении напряжения холостого хода (U_{xx}) и периодическом сканировании ВАХ с целью определения оптимальных параметров. Имеет такие же преимущества, как и второй метод.

Четвертый метод [9, 10] основан на одномоментном определении ТММ. Полученное значение остается фиксированным и не изменяется в процессе заряда, поэтому КПД такого метода самое низкое, необходим жесткий выбор рабочей точки.

Исходя из заданных требований к проведению экспериментов в данной работе, мы использовали наиболее распространенный первый метод.

На рис. 2 представлена применяемая принципиальная схема контроллера типа ОТММ без микроконтроллера управления.

Работа контроллера типа ОТММ основана на схеме синхронного понижающего преобразователя (LM2596). Данный преобразователь понижает более высокое напряжение солнечной панели до напряжения зарядки АБ. Микроконтроллер (рис. 3) пытается максимизировать мощность от СП, управляя рабочим циклом, чтобы солнечная панель работала в точке максимальной мощности [11].

Контроллер типа ОТММ состоит из следующих элементов (см. рис. 2): $JP1$ – винтовой зажим, предназначенный для подключения солнечной панели, $JP2$ – выходной винтовой зажим для подключения АБ, зажим $JP3$ служит для подключения нагрузки; $F1$ и $F2$ – предохранители на 5 А. От правильного расположения, подключения и корректной работы зажимов зависит процесс заряда СП. Неправильная работа какого-либо из зажимов вызывает сигнал об отказе при зарядке.

Понижающий преобразователь напряжения состоит из синхронных полевых транзисторов-переключателей $Q2$ и $Q3$ и катушки индуктивности $L1$, а также конденсаторов $C1$ и $C2$. Катушка индуктивности сглаживает ток переключения и вместе с конденсатором $C2$ сглаживает выходное напряжение. Конденсатор $C8$ и резистор $R6$ представляют собой демпфирующую сеть, которая используется для обрезания напряжения катушки индуктивности, произведенного переключением током в катушке индуктивности.

Полевой транзистор $Q1$ предназначен [12] для исключения заряда ночью. В некоторых контроллерах заряда вместо полевых транзисторов в цепи питания применяются диоды. Однако в нашем случае применение полевого транзистора обусловлено возможностью регулирования зарядного тока, контролем напряжения и шунтированием токоограничительного резистора, который задает заряд малым током (1...2% от емкости аккумулятора), что является важной функцией для исследуемых систем. Полевой транзистор $Q1$ включается, когда полевой транзистор $Q2$ включен от напряжения через диод $D1$. Резистор $R1$ снимает напряжение с затвора полевого транзистора $Q1$, поэтому он отключается при выключении полевого транзистора $Q2$.

Особенностью разработанной схемы является применение полевых транзисторов вместо диодов, что позволяет уменьшить падение напряжения. Диод $D3$ – СВЧ-диод, который повышает эффективность конвертера; $IR2104$ – это полумостовой драйвер для управления полевыми транзисторами с помощью ШИМ-сигнала от микроконтроллера (вывод $D9$). Полумостовой драйвер также можно отключить управляющим сигналом (низкий уровень на выводе $D8$) от микроконтроллера. Диод $D2$ и конденсатор $C7$ являются частью схемы начальной загрузки, которая генерирует напряжение возбуждения затвора высокой стороны для полевых транзисторов $Q1$ и $Q2$.

Для измерения тока использовали датчик тока с эффектом Холла ($ACS 712$). Он считывает текущее значение и преобразует его в соответствующее значение напряжения. Датчик тока измеряет ток от солнечной панели и подает на аналоговый вывод микроконтроллера $A1$.

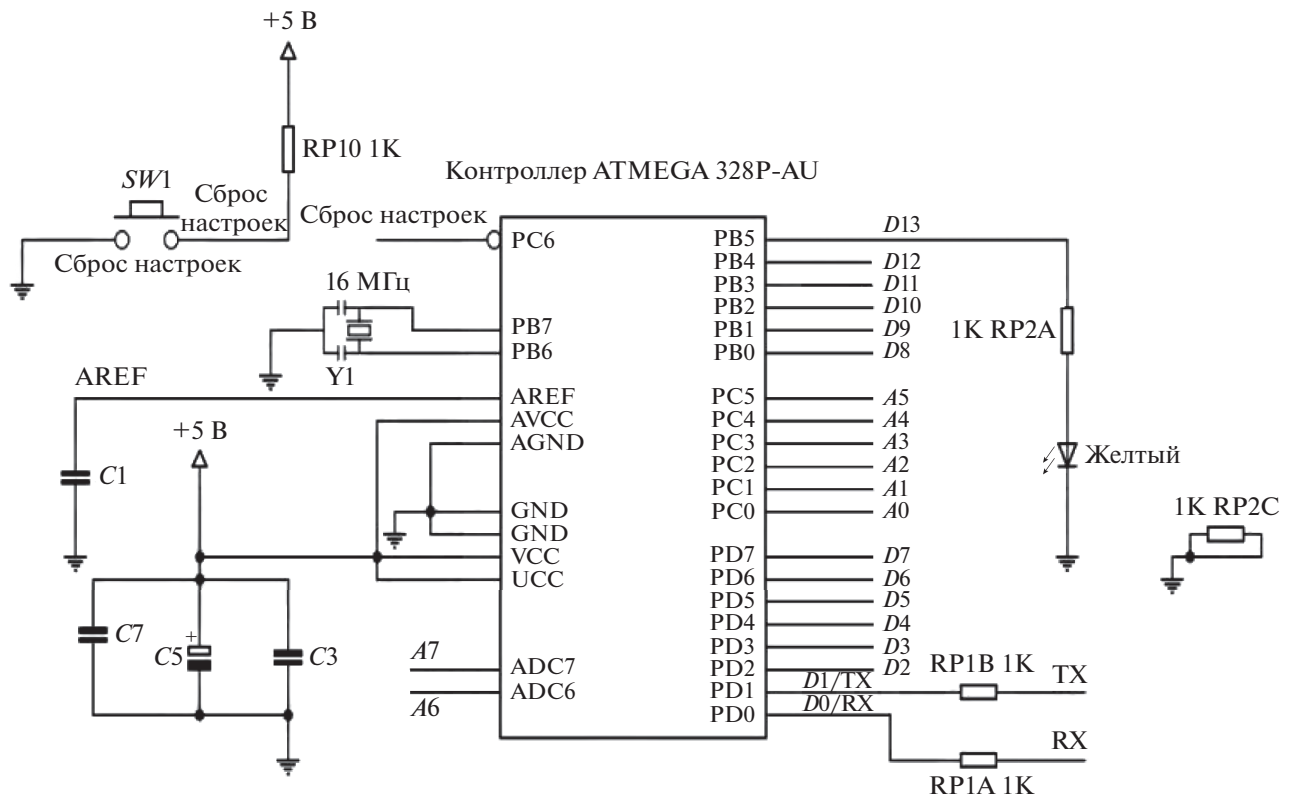


Рис. 3. Принципиальная схема микроконтроллера.

Для мониторинга используется регистрации данных с помощью модуля Wi-Fi, который обеспечивает автоматическую передачу информации.

В результате проведенных исследований была разработана математическая модель для СП с целью ее оптимизации. ВАХ представлена следующим уравнением:

$$I_{CЭ} = I_{\Phi} - I_{\text{он}} \left\{ \exp \left[\frac{e(U_{CЭ} + I_{CЭ} R_{\Pi})}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{CЭ} + I_{CЭ} R_{\Pi}}{R_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где A — поправочный коэффициент, принимает значения от 1 до 5; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана, $k/e = 8.62 \times 10^{-5}$ эВ/К; T — температура элемента, К; R_{Π} , $R_{\text{ш}}$ — последовательное и шунтовое сопротивления СЭ, Ом; $U_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$ — напряжение (в В) и ток (в А), протекающий через диод VD , моделирующий p - n -переход; I_{Φ} — фототок, протекающий через p - n -переход; $I_{\text{он}}$ — обратный ток насыщения p - n -перехода; $I_{CЭ}$, $U_{CЭ}$ — выходные ток и напряжение СЭ.

Приняты следующие обозначения параметров солнечного элемента: ток, напряжение, мощность соответственно I , U , P , а параметры СБ — $I_{CБ}$, $U_{CБ}$, $P_{CБ}$.

На рис. 4 представлена схема замещения солнечного элемента и его эквивалентная схема.

Обозначим $k_0 = e/(AkT)$, тогда формулу (1) можно представить в виде

$$I = I_{\Phi} - I_{\text{он}} \{ \exp[k_0(U + IR_{\Pi})] - 1 \} - (U + IR_{\Pi})/R_{\text{ш}}. \quad (2)$$

Математическая модель СЭ обязана соответствовать следующему условию: сумма в (2) должна представлять собой диодное напряжение $U_{\text{д}}$, падающее на самом СЭ. Величина этого напряжения больше выходного напряжения U , когда СЭ отдает энергию внешней нагрузке. Если направление тока в модели СЭ принять такое, как показано на рис. 4, то $U_{\text{д}} = U + IR_{\Pi}$. При обратном направлении тока знак изменится на противоположный: $U_{\text{д}} = U - IR_{\Pi}$.

Для исследования и анализа контроллеров заряда было разработано программное обеспечение (ПО) на языке Pascal (рис. 5), которое получает данные с микроконтроллера и обрабатывает их. Оно выводит данные на монитор компьютера в виде графических зависимостей. Также разработанное ПО позволяет просматривать параметры системы в реальном времени [13, 14].

Программа обеспечивает вывод экспериментальных данных в таблицу. К достоинствам данного ПО можно отнести и то, что в него можно

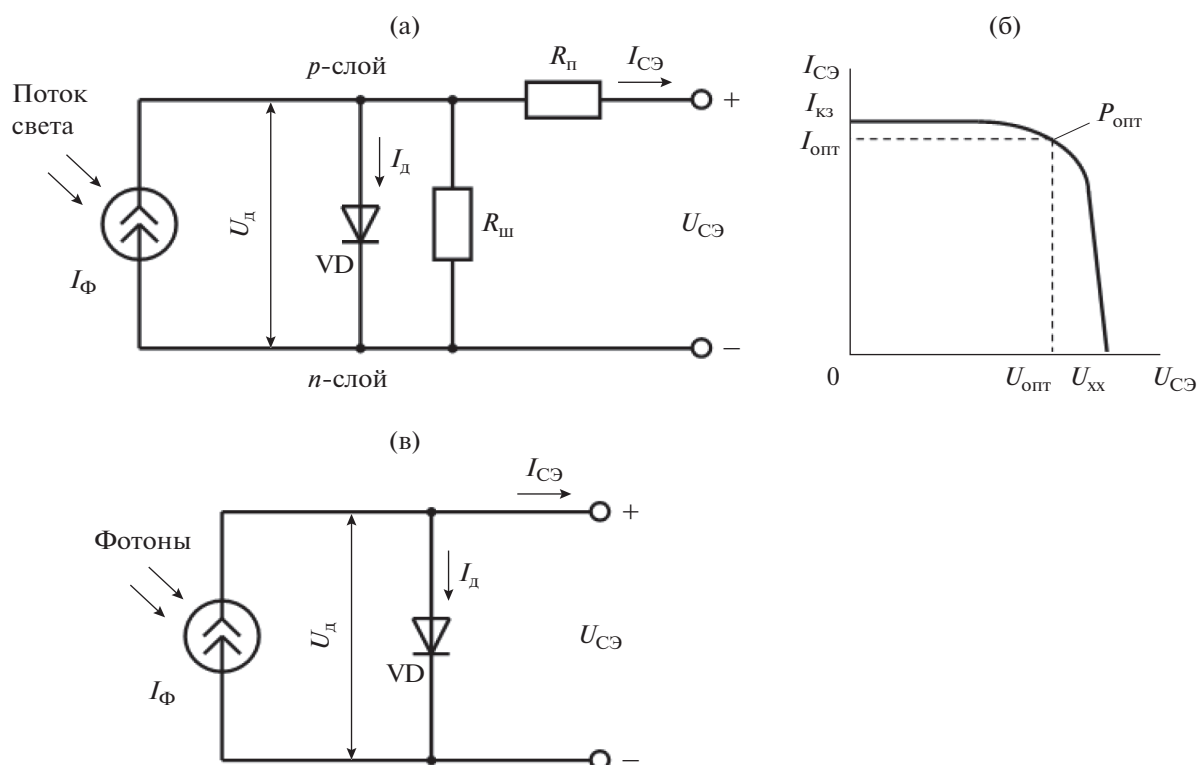


Рис. 4. Схема замещения солнечного элемента: а – эквивалентная схема; б – вольт-амперная характеристика; в – идеализированная модель СЭ.

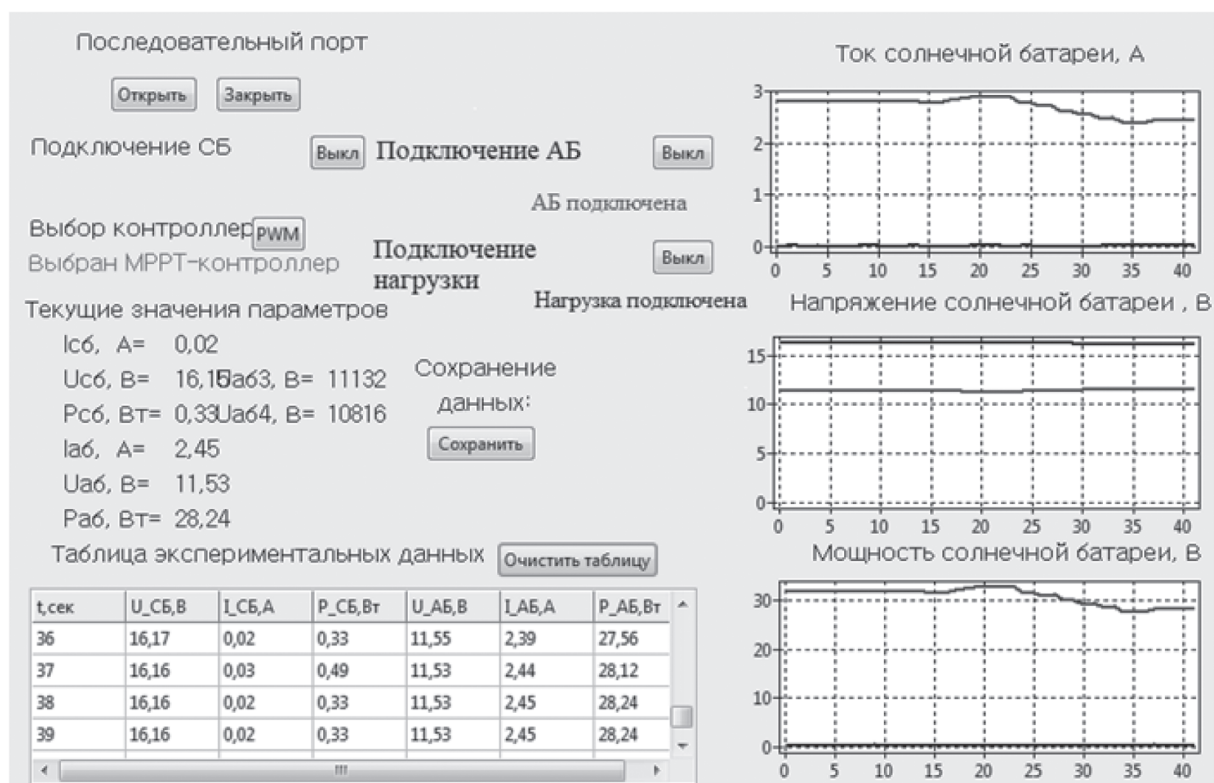


Рис. 5. Вид интерфейса программного обеспечения на языке Pascal для исследования и анализа контроллеров заряда.

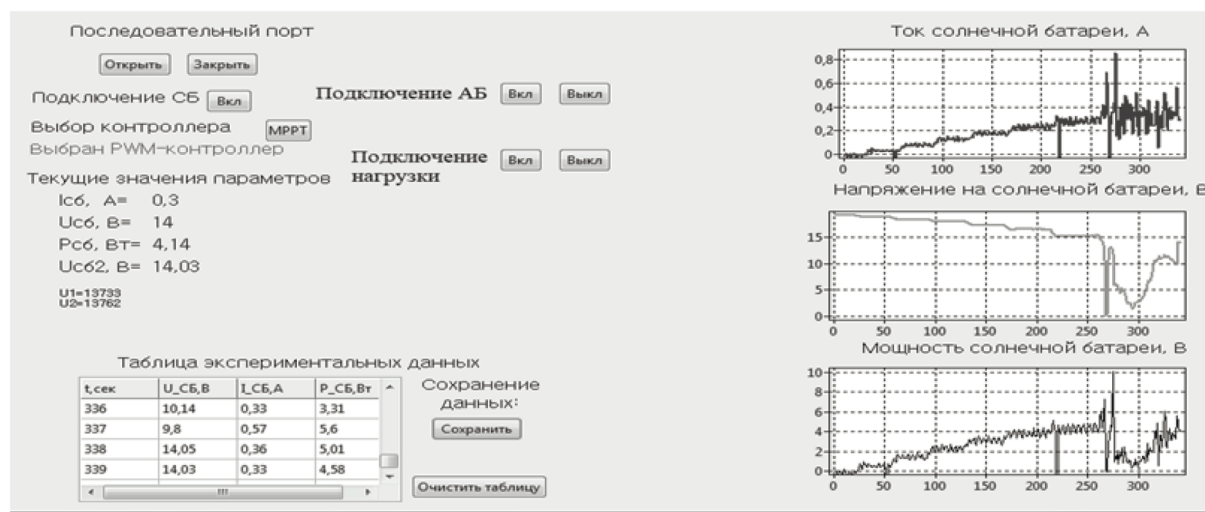


Рис. 6. Вид интерфейса программного обеспечения с данными СП и АБ.

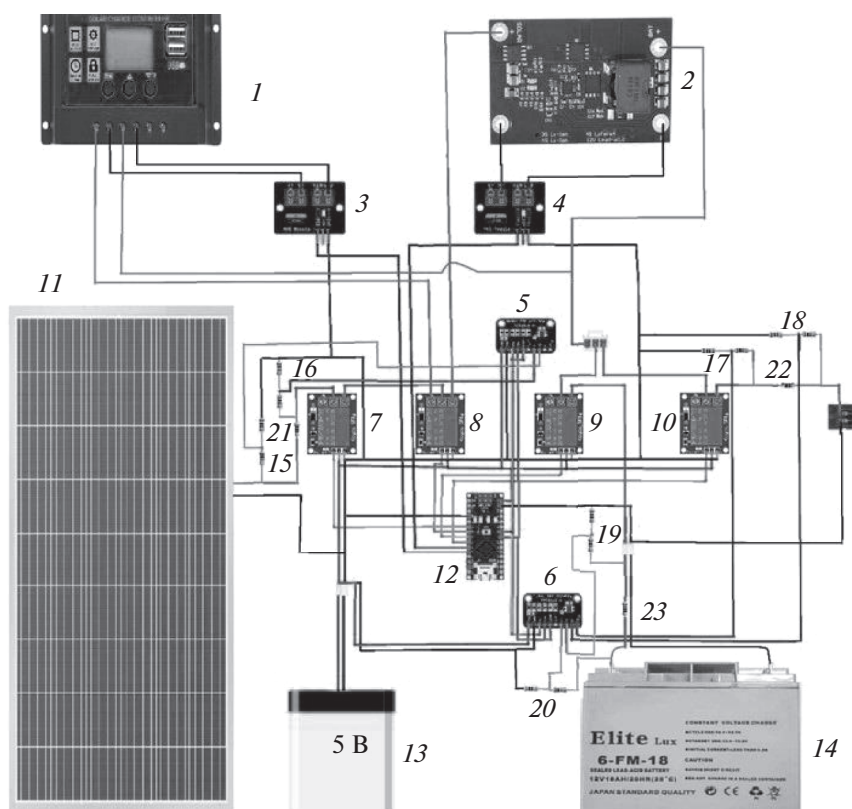


Рис. 7. Схема экспериментального стенда для исследования и анализа контроллеров заряда солнечных панелей: 1 – контроллер типа ШИМ; 2 – контроллера типа ОТММ; 3, 4 – силовые ключи на полевых транзисторах; 5, 6 – АСП-модули; 7–10 – реле-модули; 11 – СП; 12 – микроконтроллер; 13 – АБ 5 В для питания схемы управления; 14 – АБ 12 В для накопления энергии с СП; 15–20 – делители напряжения; 21–23 – шунтирующие резисторы.

добавлять другие функции и выводить одновременно несколько зависимостей. На рис. 6 показан пример вывода данных с СП и АБ.

Для экспериментального исследования и анализа контроллеров заряда солнечных панелей был разработан стенд, схема которого представ-

лена на рис. 7. Результаты экспериментальных исследований контроллеров заряда солнечных панелей, полученные с помощью разработанного стенда, приведены на рис. 8: ВАХ солнечной панели (рис. 8а) и зависимости мощностей от напряжений солнечной панели (рис. 8б).

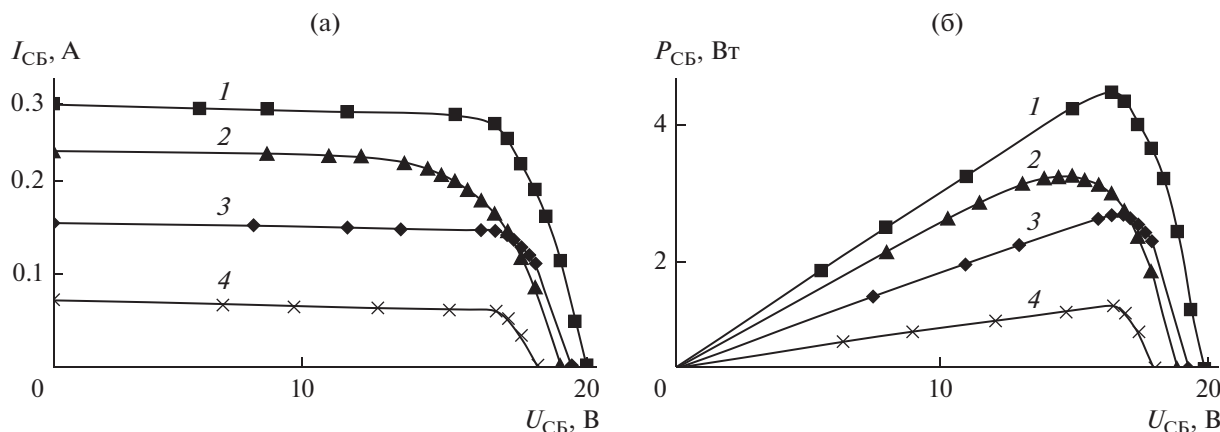


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика солнечной панели (а) и зависимости мощностей от напряжений солнечной панели (б): кривые 1 – характеристика СП при оптимальном угле направления на Солнце и при открытом окне; 2 – угол направления на Солнце θ_0 и открытом окне; 3 – оптимальный угол направления на Солнце и закрытом окне; 4 – угол направления на солнце θ_0 и закрытом окне.

Далее по данным, полученным в ходе работы на данном стенде, были построены экспериментальные зависимости (рис. 9а–9в) мощности от времени при ступенчатой нагрузке (рис. 9а) и зависимости тока и напряжения от времени при ступенчатой нагрузке (рис. 9б, 9в). Это одни из основных временных зависимостей основных параметров солнечной панели [15, 16].

Мощность от времени при ступенчатой нагрузке носит ступенчатый характер и является функцией от потребляемого тока внешней нагрузкой.

На рис. 10 представлены характеристики при ступенчатом повышении потребляемого тока с помощью электронной нагрузки. Как видно из рисунка, происходит снижение напряжения на АБ и возрастание отдаваемой мощности.

Далее были получены характеристики для контроллеров типа ШИМ (рис. 11а) и типа ОТММ (рис. 11б).

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что общий заряд, передаваемый на АБ, был выше

в случае контроллера типа ОТММ при более низкой мощности, собираемой с СП. Также следует отметить, что у контроллера типа ШИМ на этапе зарядки “Максимальный заряд”, который длится около 56 мин, сила тока, подаваемая на АБ, меньше, чем сила тока на СП, из-за потерь в электронике. Иная картина наблюдается у контроллера типа ОТММ, у которого на этапе зарядки “Максимальный заряд”, длящемся около 32 мин, в результате процесса инверсии/преобразования к АБ может быть подан больший ток с повышенной плотностью тока [17], чем было произведено с СП, что приводит к сокращению времени зарядки. Также отметим, что у контроллера типа ШИМ этап зарядки “Насыщение/Поддержка” занимает 3 ч 12 мин, тогда как у контроллера типа ОТММ этап зарядки “Прием/Поддержка” занимает 2 ч 29 мин. Это также является существенным преимуществом контроллера типа ОТММ, так как сокращается время зарядки АБ.

Таблица 1. Сравнение полученных экспериментально параметров для контроллеров ШИМ и ОТММ

Параметр	Контроллер ШИМ	Контроллер ОТММ
Напряжение СП	Напряжение СП и напряжение АБ должны быть равны	Напряжение СП может быть выше, чем напряжение АБ
Напряжение АБ	Наилучшей производительности можно достичь при идеальной температуре (около 25°C) и при почти полной зарядке АБ	АБ можно заряжать при низких температурах и низкой емкости напряжения
Эффективность применения	Лучше всего подходит для небольших систем, где преимущества контроллера типа ОТММ неэффективны с точки зрения затрат	Применяются в основном в системах мощностью 200 Вт+, так как позволяют раскрыть все преимущества этого типа контроллера, хотя могут быть применены и в менее мощных системах

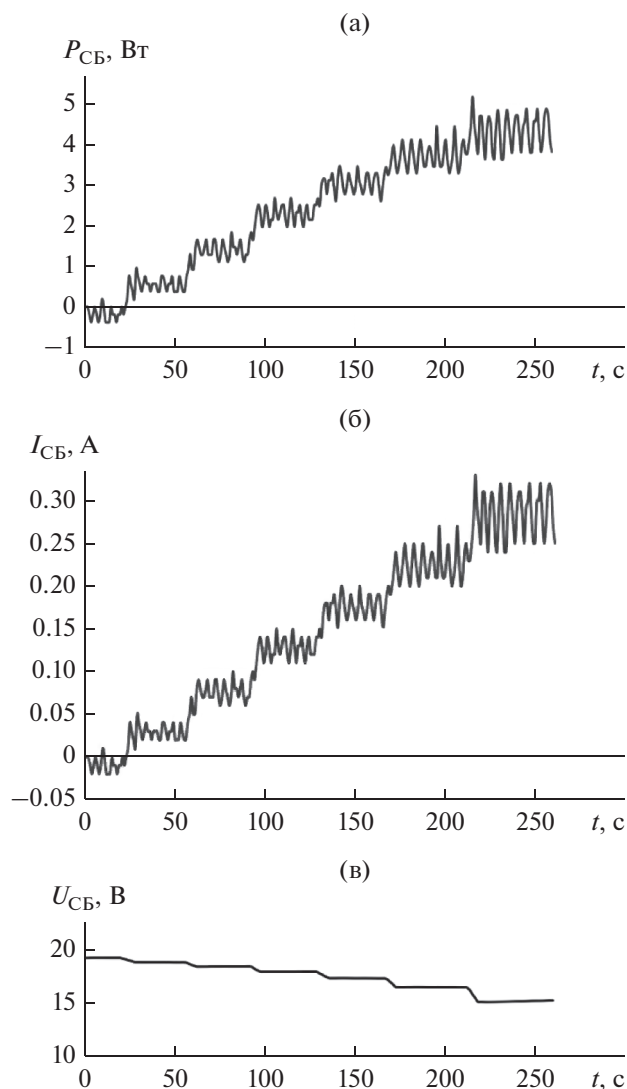


Рис. 9. Зависимости мощности (а), тока (б) и напряжения (в) от времени при ступенчатой нагрузке.

Сравнение некоторых параметров, полученных в результате экспериментов, для каждого типа контроллеров представлены в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе представлено описание контроллеров заряда солнечной панели, а также предложена схема комбинированной силовой установки с их использованием. Рассчитана точка максимальной мощности солнечной батареи из поликристаллического кремния. Предложено программное обеспечение на языке Pascal для исследования и анализа контроллеров заряда, которое может быть использовано для солнечных батарей разного типа, в том числе из перовскита. Исследование контроллеров показало, что контроллер типа

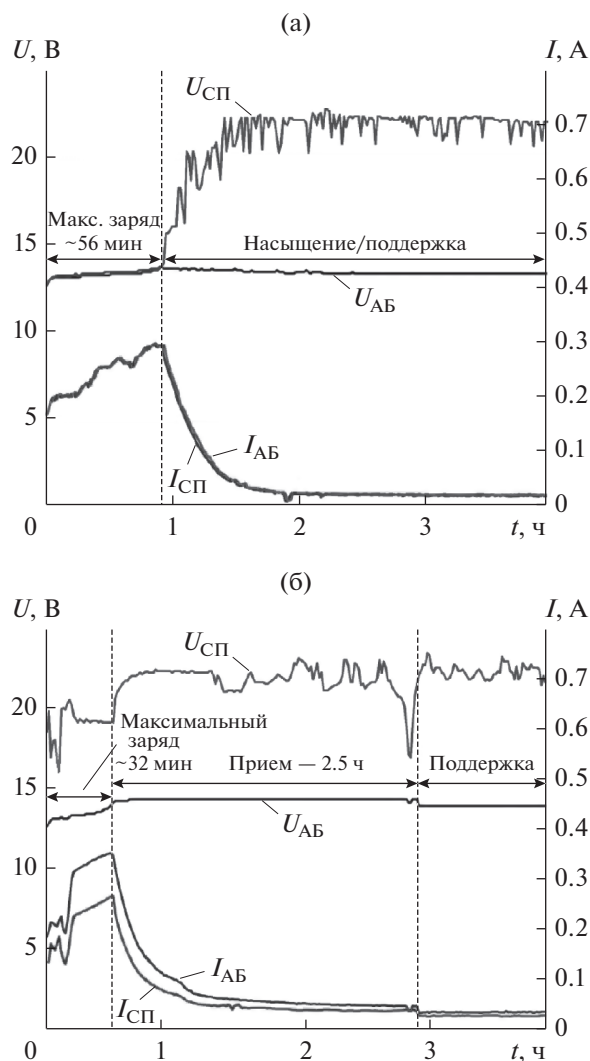


Рис. 10. Характеристики контроллера заряда типа ШИМ (а) и ОТММ (б).

ОТММ обладает лучшими характеристиками, т.к. обеспечивает более высокий заряд.

Рассмотренный в данной работе контроллер заряда типа ОТММ может быть рекомендован к использованию в системах солнечных батарей разного типа, например, монокристаллических (Si, GaAs, перовскит), поликристаллических, фотохимических, аморфных, органических или их комбинации, а также для использования в сложных погодных и климатических условиях и при режимах работы в условиях высоких температур, что требует отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кашикаров А.П.* Маркировка радиоэлементов. М.: ДМК Пресс, 2011.

2. *Германович В., Турилин А.* Альтернативные источники энергии и энергосбережение. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, земли, воды, биомассы. СПб.: Наука и Техника, 2014.
3. *Баскаков А.П., Муңц В.А.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. М.: ИД “БАСТЕТ”, 2013.
4. *Зуев С.М., Шматков Ю.М., Малеев Р.А. et al.* Электрооборудование и электроника автомобилей в основных терминах с их объяснением на русском и английском языках. Учебный справочник. М.: Московский Политех, 2017.
5. *Васильев А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971.
6. *Куашнинг Ф.* Технология-Расчеты-Моделирование. Астана, 2013.
7. *Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А.* Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Томск. политех. ун-т, 2015.
8. *Зуев С.М.* // Тез. докл. 4-го Междисциплинар. научн. форума с межд. уч. “Новые материалы и перспективные технологии”. М.: Буки Веди, 2018. Т. 1.
9. *Зуев С.М., Алексюк М.Р., Канарейкин А.И. и др.* // Изв. МГТУ “МАМИ”. 2019. № 1. С. 17.
10. *Малеев Р.А., Зуев С.М., Лавриков А.А., Гребенчиков Н.П.* // Изв. МГТУ “МАМИ”. 2019. № 1. С. 29.
11. *Карлащук В.И.* // Инженерный вестник. 2014. № 10. С. 501.
12. *Акимов А.В., Варламов Д.О., Зуев С.М.* Конструкция, описание работы и проведение диагностики системы электростартерного пуска современных транспортных средств. М.: Московский Политех, 2017.
13. *Гаврилов С.А.* Схемотехника. Мастер-класс. М.: Наука и Техника, 2016.
14. *Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В., Кучер Т.В.* Программирование на Free Pascal и Lazarus. М.: Интуит, 2016.
15. *Шматков Ю.М., Зуев С.М., Лавриков А.А.* Исследование работы системы электростартерного пуска транспортных средств. М.: Московский Политех, 2017.
16. *Скворцов А.А., Рыбин В.В., Зуев С.М.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 6. С. 73.
17. *Skvortsov A.A., Zuev S.M., Koryachko M.V.* // Key Eng. Mater. 2018. № 771. P. 118.