

УДК 620.93+620.91+007.52

## ЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ<sup>1</sup>

© 2020 г. О. Г. Лосев<sup>а, \*</sup>, А. С. Григорьев<sup>а</sup>, Д. А. Мельник<sup>а</sup>, С. А. Григорьев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>НИИЦ “Курчатовский институт”

пл. академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

\*e-mail: Losev\_OG@nrcki.ru

Поступила в редакцию 14.09.2018 г.

После доработки 12.02.2019 г.

Принята к публикации 04.07.2019 г.

В статье изложены предварительные результаты работ по созданию зарядной станции для электрического транспорта, основанной на энергетической установке на возобновляемых источниках энергии с использованием топливных элементов в качестве резервного источника электрической и тепловой энергии. Приведены результаты испытаний и проверок выбранных технических решений.

*Ключевые слова:* возобновляемые источники энергии, электрический транспорт, зарядная станция, быстрая зарядка электромобиля, электрохимические топливные элементы, автономная энергетическая установка

DOI: 10.31857/S0424857020020097

### ВВЕДЕНИЕ

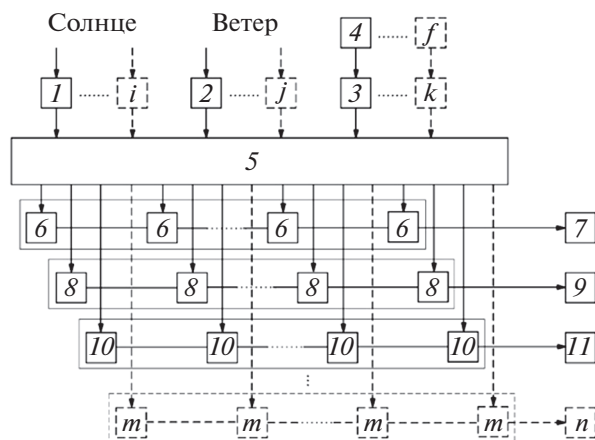
Системы генерации электроэнергии, использующие возобновляемые источники энергии, и в частности, солнечную и ветровую энергию, могут применяться в различных отраслях хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения. Одна из таких отраслей — это инфраструктура транспортных средств. Транспортный сектор вызывает озабоченность, поскольку он вносит значительный вклад в загрязнение воздуха и выбросы парниковых газов [1]. Одной из возможных мер по преодолению этой проблемы является замена автомобилей с двигателем внутреннего сгорания на электромобили. Для обеспечения повсеместного внедрения электрического транспорта необходима соответствующая инфраструктура [2]. Зарядные станции (ЗС) для обеспечения электромобилей должны быть основаны на экологически чистой энергетике, иначе эффект очищения экосистемы от использования электромобилей будет незначительный, из-за того, что для их заряда будет использоваться энергия, добытая от традиционных углеводородных источников. Создание надежных автономных энергетических установок на основе возобновляемых источников энергии поможет внести значительный вклад также и в развитие удаленных регионов, обеспе-

чить их экономическую независимость и энергетическую безопасность за счет значительного сокращения зависимости от подвоза традиционно углеводородного топлива [3].

### КОНЦЕПЦИЯ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ

Разрабатываемая энергетическая установка для станций быстрой зарядки электромобилей предназначена большей степенью для районов, в которых отсутствует централизованное снабжение электроэнергией или параметры имеющейся электросети не соответствуют параметрам, необходимым для осуществления принципа быстрого заряда. В этой связи, авторами была предложена автономная энергоустановка на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и топливных элементов (ТЭ). Необходимую для зарядки электромобиля электроэнергию станция накапливает в аккумуляторных батареях (АБ), используя разнообразные первичные источники электроэнергии: солнечные батареи (СБ), ветрогенераторы (ВГ) и топливные элементы (ТЭ). Солнечные батареи и ветрогенераторы являются основными источниками электроэнергии; топливные элементы используются в малосолнечные и безветренные дни. В качестве резервного источника электроэнергии в составе энергетической установки предусмотрен мотор-генератор (МГ) на основе двигателя внутреннего сгорания, который используется только при невозможности работы

<sup>1</sup> Публикуется по материалам V Всероссийской конференции с международным участием “Топливные элементы и энергоустановки на их основе”, Суздаль, 2018.



**Рис. 1.** Структура энергетического комплекса на основе ВИЭ и ТЭ. 1-*i* – модули генерации, основанные на солнечных батареях; 2-*j* – модули генерации, основанные на ветрогенераторах; 3-*k* – модули генерации, основанные на электрохимических топливных элементах; 4-*f* – резервуары с топливом для электрохимических топливных элементов; 5 – общий контроллер заряда и распределения энергии; 6, 8, 10-*m* – модули накопления энергии, основанные на аккумуляторных батареях; 7, 9, 11-*n* – блоки полезной нагрузки.

основных источников. Штатная работа станции заключается в постепенном накоплении электроэнергии, поступающей от ВИЭ и ТЭ в аккумуляторных батареях с последующей быстрой отдачей значительной электрической мощности, требующейся для быстрой зарядки электротранспорта в момент его прибытия на ЗС.

Развитие инфраструктуры, состоящей из станций быстрого заряда электротранспорта, подразумевает создание точек отбора повышенной электрической мощности для зарядки электромобилей. Стоит добавить, что средняя потребляемая электрическая мощность, необходимая для нормальной сетевой автозаправочной станции, составляет 40 кВт, которая в свою очередь распределяется на электроснабжение помещений, кассовых аппаратов, насосных устройств колонок [4, 5], средняя мощность быстрой зарядки электротранспорта составляет 60–100 кВт, а устройства ультрабыстрого заряда требуют 300 кВт. Реализовать быстрый или ультрабыстрый заряд электротранспорта в условиях прямого подключения к маломощной внешней электросети весьма проблематично.

Проблему улучшения качества электроэнергии и уменьшения падения мощности в электросетях решит создание автономных зарядных станций, работающих преимущественно на генерации от возобновляемых источников энергии и системы накопителей, основанных на аккумуляторных батареях. То же самое относится к энергоустановкам, использующим топливные элемен-

ты, работающие на водороде, спиртах, сжиженном газе или природном газе. В качестве альтернативы обычным АБ возможно использование резервной системы “электролизер–электрохимический генератор”, позволяющей накапливать избыточную энергию в виде водорода и отдавать ее по мере необходимости потребителю. Имея подключение к центральной сети, подобная система может отдавать другим потребителям энергию в момент профицита поступления энергии от возобновляемых источников.

Станции заряда электрического транспорта, реализующие принцип быстрой зарядки, требуют мощных источников электричества высоких показателей тока и напряжения – порядка 600 В и 100 А, которые необходимо поддерживать в среднем в течение 30 мин. Таким источником в случае использования нестабильной мощности от ВИЭ может быть только аккумуляторная батарея в составе ЗС, в которой энергия предварительно накоплена. Случайный характер генерации от ВИЭ требует применения разных первичных источников (солнечных панелей, ветряной турбины и, как резерва, топливных элементов), возможно, разнесенных в пространстве. Совместная работа источников на нагрузку может быть реализована разными способами, самым простым из которых является применение высоковольтных зарядных устройств для блока АБ.

Из существующих принципов реализации подобных установок, все сводится либо к созданию системы, повышающей параметры тока и напряжения через использования инверторов и повышающих трансформаторов, либо создания единой АБ, для зарядки которой необходим контроллер высокой мощности [6], что ведет к тому, что обслуживанию АБ происходит при высоком напряжении, что усложняет и удорожает операции.

Основываясь на имеющимся опыте создания автономных энергетических установок для локальных потребителей [7], было принято решение о создании зарядной станции с использованием контроллера распределения энергии, который позволяет, используя стандартные МРРТ контроллеры заряда, широко доступные на рынке, проводить заряд АБ и затем, коммутируя необходимое количество накопителей в последовательную цепь, подавать на зарядный блок электрического транспорта электроэнергию с необходимыми параметрами [8].

Количество аккумуляторных батарей, соединяемых последовательно в каждом из модулей накопления энергии (рис. 1), определяется величиной напряжения, необходимого для электропитания каждого из блоков полезной нагрузки. Модуль генерации (рис. 2), основанный на СБ, подключен к МРРТ контроллеру зарядного тока. Контроллер настроен на номинальное напряже-

ние АБ 48 В и отдает максимально возможный ток, полностью используя выработанную солнечной батареей мощность. Модуль генерации, основанный на ВГ, также подключен к своему МРРТ контроллеру, который настроен так же, как контроллер солнечных батарей, на отдачу максимально возможного тока при напряжении 48 В. Модуль генерации, основанный на ТЭ, — стандартное устройство, вырабатывающее электроэнергию с помощью каталитической реакции сжигания водорода (метилового спирта, природного газа, пропан–бутана) и отдающее зарядный ток при напряжении 48 В. Мотор–генератор используется как резервное устройство при недостатке энергии солнца и ветра и невозможности работы топливного элемента. Выходное напряжение мотор–генератора также 48 В. Несмотря на декларируемый статус резервного устройства, в случае необходимости ускоренного заряда накопительной аккумуляторной батареи мотор–генератор может быть запущен вместе со всеми остальными источниками зарядного тока.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Параметры действующей экспериментальной модели (рис. 2):

- максимальная электрическая мощность, реализуемая в течение 0.5 ч: 24 кВт;
- максимальный ток полезной нагрузки: постоянный, 50 А;
- выходное напряжение постоянного тока: до 672–480 В.

Работа зарядной станции разделена преимущественно на три режима:

1. Режим заряда накопителей электроэнергии.
2. Режим разряда накопителей электроэнергии.
3. Спящий режим.

Режим заряда определяется тем, что контроллером распределения энергии осуществляется коммутация накопителей энергии, основанных на аккумуляторных батареях в параллельную цепь. Показатель напряжения системы в таком режиме равен показателю напряжения одного накопителя электроэнергии. В таком положении электроэнергия, идущая от источников, поступает на накопители электроэнергии, при этом соблюдается условие, при котором энергия с источника электроэнергии может попадать на любой из накопителей электроэнергии, но без перетекания электроэнергии с одного накопителя на другой.

Режим разряда определяется тем, что контроллером распределения энергии производится последовательное соединение накопителей электроэнергии. Показатель напряжения будет равняться сумме напряжений всех накопителей электроэнергии основанных на аккумуляторных



Рис. 2. Действующая экспериментальная модель энергетического комплекса.

батареях. В таком виде энергия подается на зарядный блок, который уже и заряжает электрический транспорт.

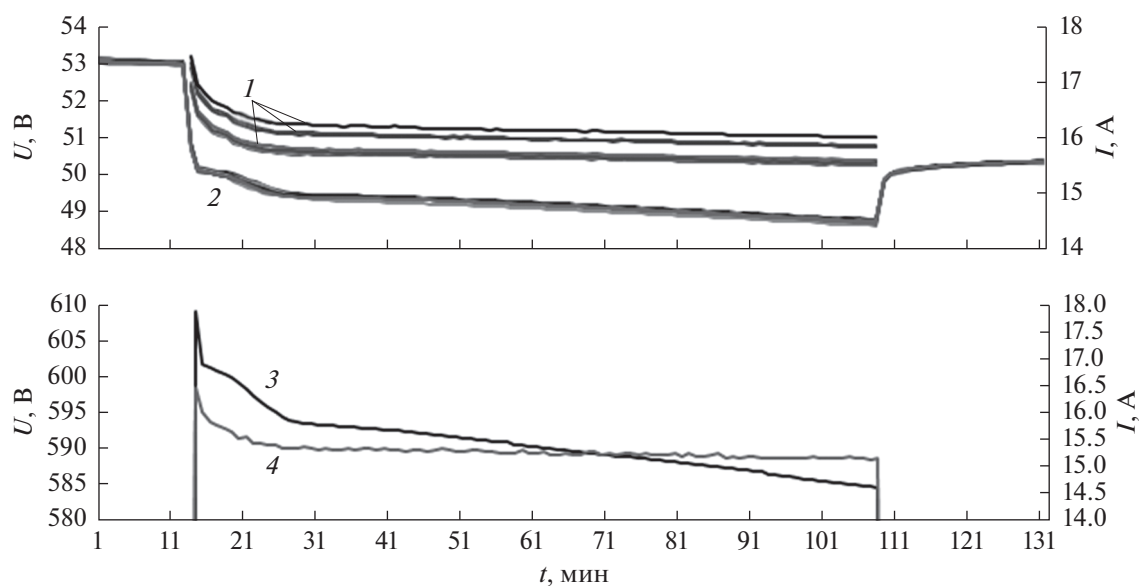
Спящий режим определяется условием, когда накопители энергии, основанные на аккумуляторных батареях, полностью заряжены, а также полон резервуар с водородом. В таком случае контроллер распределения энергии отключает от источников энергии все накопители и направляет избыточную энергию с необходимыми параметрами в центральную сеть.

Для проверки правильности принятых технических решений был проведен натурный эксперимент, при котором использовались имитаторы источников энергии и нагрузка. На рис. 3 приведены графики разряда накопителей энергии. На графиках показано как меняется напряжение и разрядный ток на каждой из 12 групп АБ. Результаты испытаний показали работоспособность системы.

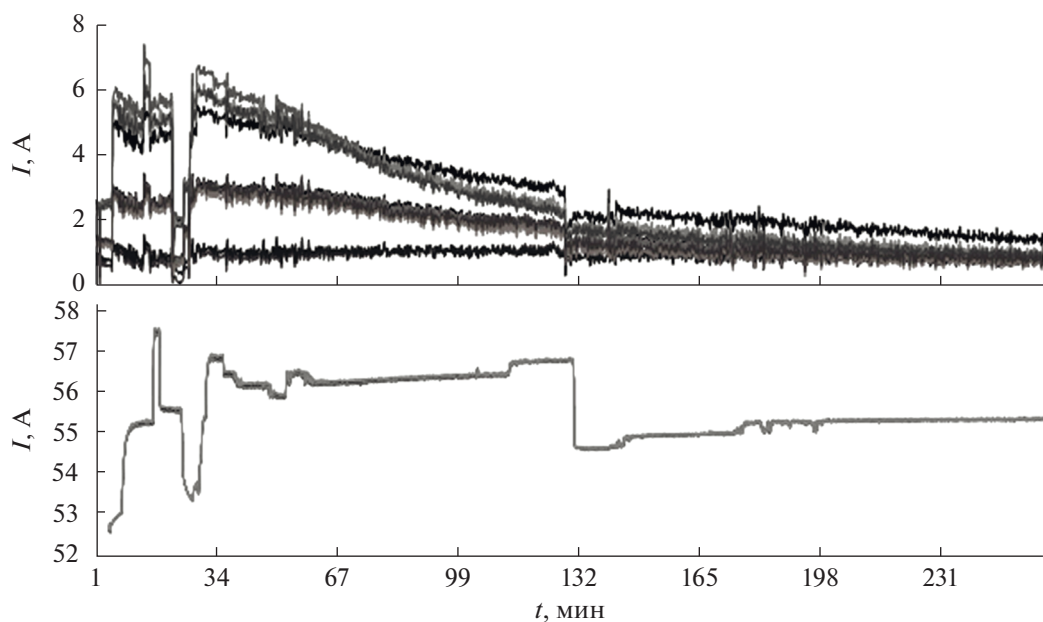
На рис. 4 можно проследить принцип работы разработанного контроллера распределения энергии [8], который позволяет уравнивать заряды массива аккумуляторных батарей, состоящего из 12 групп, номинальным напряжением 48 В, при этом избежав перетекание энергии от одного накопителя на другой.

На графиках, изображенных на рис. 4 видно, что на момент заряда группы аккумуляторов подошли в различных состояниях. В результате работы контроллера распределения энергии больший ток направляется на ту ветку АБ, которая на момент начала заряда имеет наименьшее напряжение (рис. 4). Также на графиках видно, как по мере заряда напряжение на всех ветках, а также ток заряда стабилизируются и приобретают наиболее однообразный вид.

На рис. 5 отображены параметры АБ энергоустановки при заряде электромобиля Mitsubishi i-MiEV. С использованием схемы, описанной в



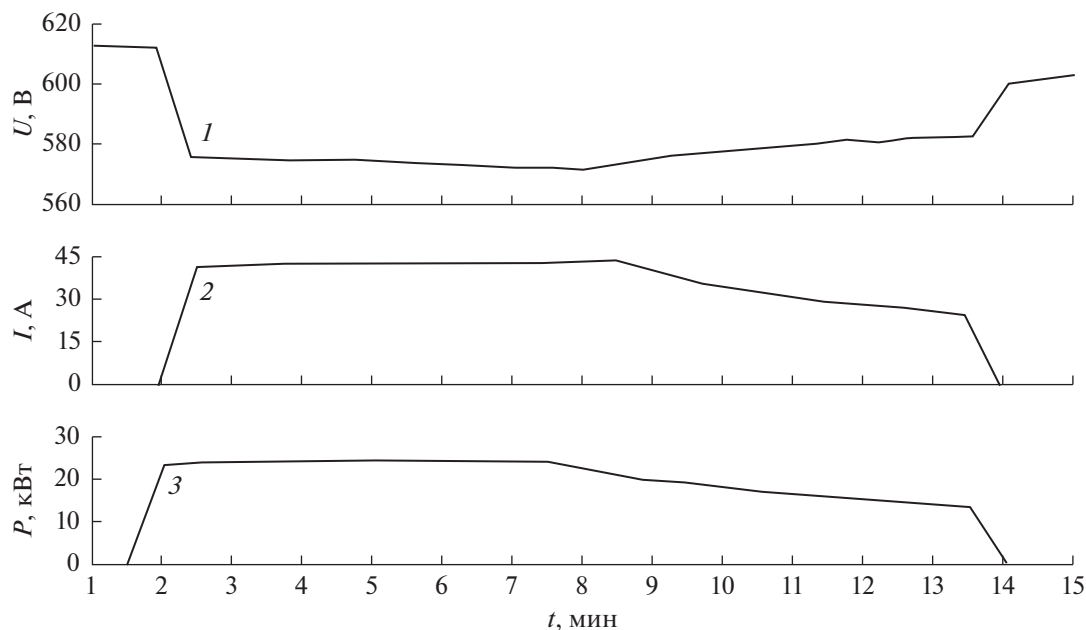
**Рис. 3.** Показатели напряжения и тока разряда во время проверочных испытаний: 1 – ток разряда на каждой из 12 групп АБ, 2 – напряжение на каждой из 12 групп АБ, 3 – напряжение последовательно соединенных 12 групп АБ, 4 – ток разряда последовательно соединенных 12 групп АБ.



**Рис. 4.** Показатели напряжения и тока 12 групп АБ во время заряда.

[8], массив аккумуляторных батарей, состоящий из 12 групп с номинальным напряжением 48 В каждая, находящийся в специально оборудованном контейнере (рис. 6), с помощью автоматической системы коммутации контроллера распределения энергии был коммутирован в последовательную цепь. Учитывая, что напряжение одной заряженной группы составляет 56 В, напряжение последовательной цепи составило около 672 В,

что попадает под требования зарядных блоков, реализующих принцип быстрой зарядки. На графиках отображено напряжение массива АБ энергостановки и ток разряда массива АБ. Емкость аккумуляторных батарей Mitsubishi i-MIEV составляет 16 кВт ч. При этом во время заряда, который длился в среднем около 10 мин, было отдано около 6 кВт ч энергии. С учетом того, что на момент заряда электромобиль находился не в



**Рис. 5.** Показатели параметров тока, напряжения и передаваемой силовому зарядному блоку энергоустановкой мощности при заряде автомобиля Mitsubishi i-MiEV: 1 – напряжение массива АБ энергетической установки, 2 – разрядный ток массива АБ, 3 – мощность, передаваемая электромобилю через силовой зарядный блок “Фора”.

полностью разряженном состоянии, емкость АБ электромобиля в результате быстрого заряда по протоколу “CHAdeMO” достигла 80%, после чего электромобиль автоматически отключился от зарядной станции. В результате испытаний энергоустановка полностью подтвердила свою работоспособность.

“CHAdeMO” – это стандарт быстрой зарядки батареи электротранспорта постоянным током через специальный разъем. Аббревиатура расшифровывается с французского как “charge de mode”, что на русский можно перевести как “зарядись для движения”.

*Использование топливных элементов в качестве резервных источников электрической и тепловой энергии в зарядной станции*

Российские климатические условия (изменение наружной температуры от +50 до –50°С, снежный покров, невысокий уровень солнечной радиации и ее отсутствие в период полярной ночи, стохастический характер поступающей ветровой энергии) заставляют уделить особое внимание моделированию всех физических процессов, происходящих в ЗС-электрохимии, электротехнику, тепло- и массообмен [7].

Исходными данными для тепловых расчетов является пространственное и временное распределение энерговыделения (рис. 7) в элементах зарядной станции при различных начальных условиях, параметрах АБ, режимах работы и парамет-

рах нагрузки, изменениях мощности солнечных панелей, ветрогенераторов и т.д., для чего необходима соответствующая модель электрических процессов, описывающая временной ход токов и напряжений в элементах энергоустановки и отражающая реальную структуру и параметры системы с достаточной степенью детализации.

В качестве резервного источника электрической и тепловой энергии для испытаний в составе энергоустановки было взято коммерчески доступное серийное устройство EFOY Pro 12000 Duo



**Рис. 6.** Процесс заряда электромобиля Mitsubishi i-MiEV.



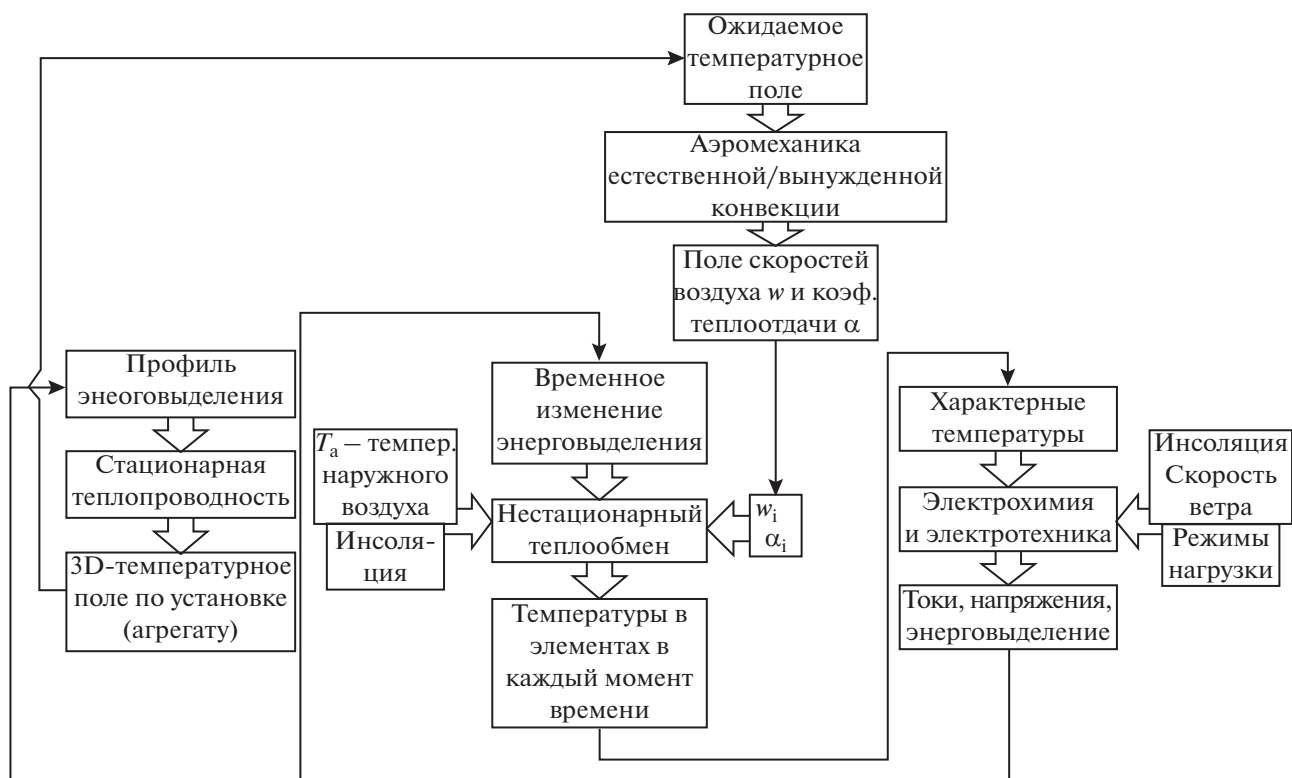


Рис. 7. Блок-схема модели теплофизических процессов.

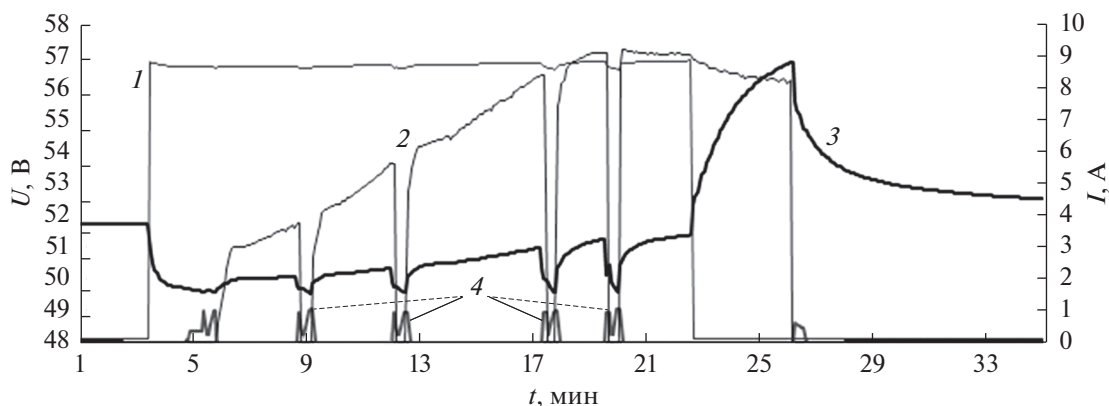
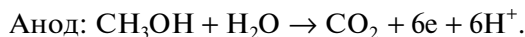


Рис. 8. Начальные испытания работы метанольного топливного элемента в составе энергоустановки в качестве резервного источника энергии: 1 – ток нагрузки, 2 – ток генерации топливного элемента, 3 – напряжение АБ, 4 – ток потребления топливного элемента.

(Германия), уровень электрической мощности которого составляет 500 Вт в одном модуле. Электроэнергия вырабатывается в результате реакции прямого окисления метилового спирта:

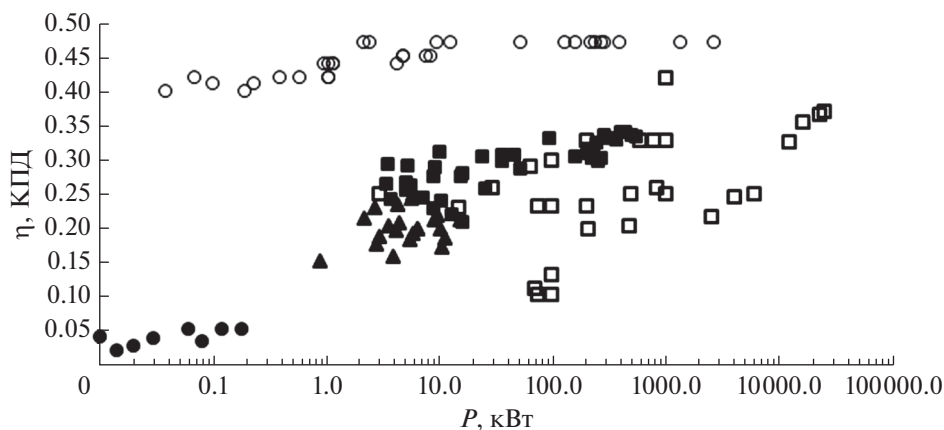


С целью увеличения выдаваемой потребителю электрической мощности такие устройства мож-

но объединять в энергогенерирующие кластеры по 5 устройств в каждом из них.

На рис. 8 показана работа топливного элемента, его включение, выход на номинал, а также взаимодействие с нагрузкой.

В широком диапазоне мощностей коэффициент полезного действия (КПД) ТЭ превосходит КПД генерирующих мощностей, основанных на иных принципах преобразования химической



**Рис. 9.** Зависимость электрического КПД от электрической мощности наиболее распространенных генераторов электрической энергии, рассматриваемых в качестве резервных: ■ — дизельные генераторы, ○ — топливные элементы (в качестве топлива водород, метанол, природный газ, пропан–бутан, ▲ — бензиновые генераторы, □ — газотурбинные установки, ● — радиоизотопные термоэлектрогенераторы.

энергии, в том числе и на двигателях внутреннего сгорания (рис. 9), что является очевидным преимуществом топливных элементов. Тем не менее, часть химической энергии, запасенной в топливе для ТЭ, переходит в тепло, которое, можно использовать для отопления блок-контейнеров с аккумуляторными батареями и соответствующей электротехнической аппаратурой в холодное время года.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что имеющаяся на данный момент элементная база отечественного производства позволяет создавать полноценные автономные энергетические установки, которые позволят создавать точки отбора высокой мощности, но существует необходимость в создании и выводе на коммерческую доступность надежных и экономичных отечественных топливных элементов, использующих помимо водорода и другие типы энергоносителей. Разработка и внедрение отечественных высокоэффективных энергоустановок на основе солнечных панелей, ветрогенераторов и топливных элементов, предназначенных для пунктов зарядки электрических транспортных средств в многочисленных удаленных регионах России, где есть проблемы с подключением к мощным централизованным сетям электроснабжения, несомненно обладает научно-технологической новизной и практической значимостью, поскольку очевидно будет способствовать обеспечению связанности обширной территории Российской Федерации.

Гарантированное обеспечение доступной электроэнергией за счет развития распределенной генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии, в первую очередь в

удаленных и изолированных энергорайонах, является одним из пунктов Указа Президента РФ № 204 от 7 мая 2018 г.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.604.21.0164 от 26.09.2017 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60417X0164).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nienhueser, Ian Andrew and Qiu, Yueming, Economic and environmental impacts of providing renewable energy for electric vehicle charging—A choice experiment study, *Appl. Energy, Acta*, 2016, vol.180, p. 256. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.121>
2. Лосев, О.Г., Марусева, И.В., Пушкарев, А.С., Григорьев, С.А., Григорьев, А.С. Заправочная станция на возобновляемых источниках энергии для водородного и электрического транспорта. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. № 3(33). С. 15. [Losev, O.G., Maruseva, I.V., Pushkarev, A.S., Grigor'ev, S.A., and Grigor'ev, A.S., Fueling station based on renewable energy sources for hydrogen and electric vehicles, *Alternative Fuel Transport' intern. sci. and technol. journal*, 2013, no. 3(33), p. 15.]
3. Bout, Anatole, Off-grid renewable energy in remote Arctic areas: Analysis of the Russian Far East, *Renewable and sustainable energy rev.*, 2016, vol. 59, p. 1029.
4. Глушкова, Д.В., Ермоленко, Б.В. Гибридные системы электро- и теплоснабжения автономных автозаправочных станций. *Успехи в химии и химиче-*

- ской технологии. 2017. Т. XXXI. № 9. С. 71. [Glushkova, D.V. and Ermolenko, B.V., Electrical and heat supply hybrid systems of autonomous auto filling stations, *J. Advances in Chem. and Chem. Technol.*, 2017, vol. XXXI, no. 9, p. 71.]
5. Русанов, А.А. Электроснабжение автозаправочной станции, Выпускная квалификационная работа бакалавра, *Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений*, идентификационный код ВКР: 830. [Rusanov, A.A., Power supply for gas stations. *Electrical equipment and electrical equipment of enterprises, organizations and institutions*. WRC id. 830.]
  6. Киселева, С.В., Попель, О.С., Тарасенко, А.Б., Титов, В.Ф. Оценка технико-экономических параметров зарядного терминала для электротранспорта на основе солнечной генерации. *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 11. Т. 133. [Kiseleva, S.V. Popel, O.S., Tarasenko, A.B., Titov, V.F., Tkacheva, T.S., and Usanov, A.B., Evaluation of technical and economic parameters of charging terminal for electric vehicles based on solar power, *Intern. Sci. Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2013, vol. 133, p. 16.]
  7. Grigoriev, A.S., Skorlygin, V.V., Grigoriev, S.A., Melnik, D.A., and Filimonov, M.N., A Hybrid Power Plant Based on Renewables and Electrochemical Energy Storage and Generation Systems for Decentralized Electricity Supply of the Northern Territories, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2018, vol.13, p. 1822. <https://doi.org/10.20964/2018.02.54>
  8. Григорьев, А.С., Григорьев, С.А., Мельник, Д.А., Филимонов, М.Н., Лосев, О.Г., Печак, В.В. *Контроллер распределения электроэнергии автономной энергетической установки*. Пат. 179979 (Россия) 2017. [Grigoryev, A.S., Grigoryev, S.A., Melnik, D.A., Filimonov, M.N., Losev, O.G., and Pechak, V.V., *Electricity distribution controller of an autonomous power plant*, Patent 179979 (Russia), 2017.]