

## Система бесперебойного и резервного энергоснабжения потребителей на основе водородно-воздушных топливных элементов и свинцово-кислотных аккумуляторов\*

Васин А. А., инж., Власкин М. С., канд. техн. наук,  
Жук А. З., доктор физ.-мат. наук, Панкина Ю. В., Тарасенко А. Б., инженеры,  
Школьников Е. И., доктор техн. наук

НИЦ-3 ОИВТ РАН, Москва

Разработан и создан экспериментальный образец системы бесперебойного и резервного энергоснабжения на основе водородно-воздушных топливных элементов и свинцово-кислотных аккумуляторов. Система состоит из электрохимического генератора максимальной мощностью 16 кВт и аккумуляторных батарей суммарной емкостью 150 А·ч, напряжением 60 В. Специально разработанное устройство интеллектуального управления экспериментальной системы обеспечивает плавное и безопасное перераспределение мощности. Номинальная мощность экспериментальной системы — 10 кВт, пиковая мощность — 22 кВт. Исследованы особенности работы экспериментальной системы при запуске и в переходных режимах работы. Оценен коэффициент полезного действия энергоустановки.

**Ключевые слова:** системы аккумулирования электрической энергии, бесперебойное и резервное энергоснабжение, электрохимический генератор, свинцово-кислотные аккумуляторы, водородно-воздушные топливные элементы.

В условиях ужесточения экологических требований к системам бесперебойного и резервного энергоснабжения все чаще на смену используемым до настоящего времени дизель-генераторным установкам предлагаются системы аккумулирования электрической энергии, имеющие широкий постоянно расширяющийся спектр возможных применений. Сегодня основными потребителями систем бесперебойного и резервного питания являются удаленные и особо ответственные потребители (системы управления и связи на транспорте, системы освещения и сигнализации, больницы, школы, станции сотовой связи и другие наиболее важные объекты инфраструктуры), требующие резервирования постоянно действующей (централизованной) электрической сети резервными и аварийными источниками питания.

Для обеспечения бесперебойного энергоснабжения весьма перспективным считается использование аккумуляторных батарей большой емкости [1, 2] (накопителей), которые имеют следующие преимущества:

возможность реализации модульного исполнения и относительная компактность конструкции;

функциональную гибкость, позволяющую работать в различных режимах;

широкие возможности автоматизации процессов управления и контроля;

простоту интеграции в интеллектуальные системы распределенной энергетики и интеллектуальные активно-адаптивные электрические сети.

Однако их более широкому распространению в малой распределенной энергетике препятствует ряд существенных недостатков:

малый ресурс работы (небольшое количество циклов заряд-разряд);

существенное уменьшение ресурса работы в пиковых режимах при разряде и заряде; специальные требования к глубине разряда; относительно высокая скорость саморазряда; низкая удельная энергоемкость.

Одним из решений проблем, присущих чисто аккумуляторным накопителям энергии, может стать создание энергетической системы, в которой основным источником энергии являются воздушно-водородные электрохимические генераторы (ВВ ЭХГ), тогда как аккумуляторные батареи, также используемые в такой системе, будут обеспечивать энергоснабжение потребителя в первые минуты после наступления аварии до момента полного выхода на режим электрогенерирующей части установки, преобразующей химическую энергию водорода в электрическую энергию. Система энергоснабжения на основе ВВ ЭХГ по сравнению с чисто аккумуляторными накопителями будет иметь более высокий ре-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственный контракт № 14.516.11.0056 от 21 июня 2013 г.).

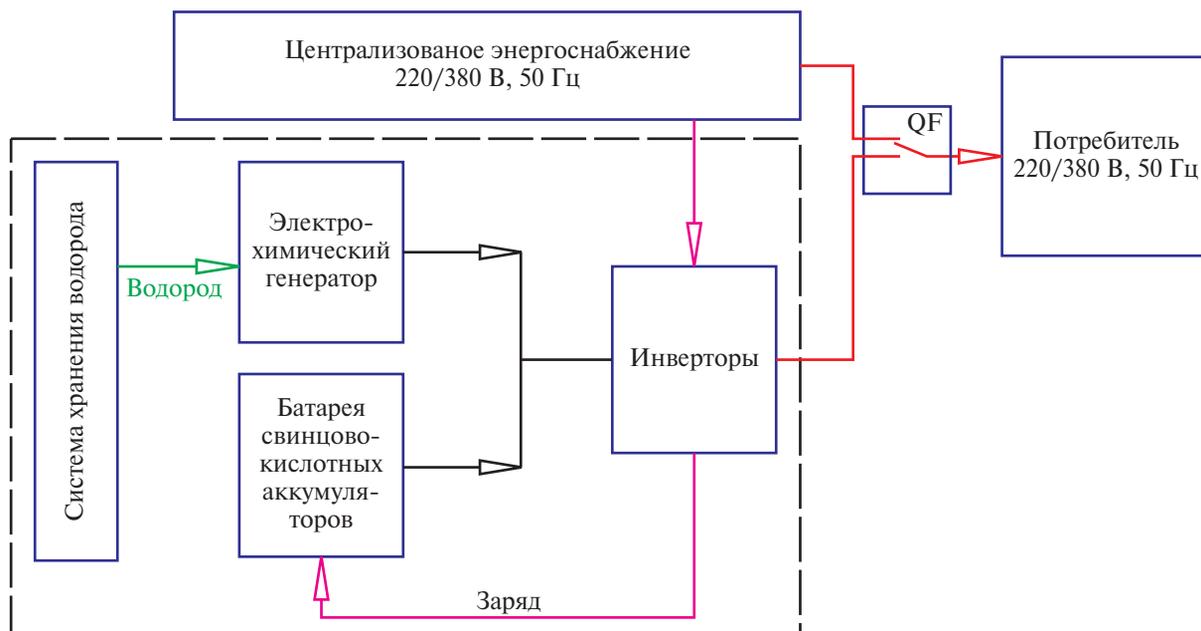


Рис. 1

сурс работы, близкий к нулю саморазряд и большую удельную энергоемкость [3].

Среди широкого спектра ВВ ЭХГ наиболее просты и проработаны батареи водородно-воздушных топливных элементов с твердым полимерным электролитом (ВВТЭ), КПД которых может достигать 35 – 45 %. Продуктом реакции в этих электрохимических генераторах являются пары воды при температуре 60 °С, что делает установку экологически безопасной [4]. Водород для питания ЭХГ может быть накоплен в процессе электролиза воды, в том числе за счет трансформации избыточной электроэнергии в сети в период снижения ее нагрузки. Кроме того, водород можно получить в результате реакции гидролиза алюминиевых отходов [5, 6], т. е. “на месте, по требованию”. Последний подход позволяет в существенной степени решить технические и экономические проблемы, связанные с производством, транспортировкой и хранением водорода. Наконец, в случае применения маломощных ЭХГ водород можно доставлять к месту использования в баллонах высокого давления.

Данная статья посвящена рассмотрению экологически безопасной системы бесперебойного и резервного энергоснабжения особо ответственных потребителей на основе комбинации ВВ ЭХГ и батареи свинцово-кислотных аккумуляторов (БСКА). Объект исследования — экспериментальный образец подобной установки номинальной мощностью 10 кВт, с помощью которого изучали

особенности функционирования данной системы, проверяли работоспособность, а также определяли ее эффективность и преимущества по сравнению с энергоустановками других типов для бесперебойного и резервного энергоснабжения.

Экспериментальная энергоустановка, структурная схема которой приведена на рис. 1, состоит из системы хранения водорода, ЭХГ на основе ВВТЭ с твердым полимерным электролитом, батареи свинцово-кислотных аккумуляторов, инверторов напряжения и показанного на рис. 2 устройства интеллектуального управления (УИУ).

Система хранения водорода представляет собой водородную рампу, состоящую из пяти баллонов высокого давления. Предполагается, что по мере использования водорода израсходованные водородные баллоны заменяют на вновь доставленные к месту расположения энергетической системы или заполняют с помощью близлежащей установки для производства водорода.

ЭХГ — это поставляемое компанией “Heliocentris GmbH” серийное изделие на базе ВВТЭ производства фирмы “Hydrogenics”. Батарея состоит из 80 топливных элементов, общее напряжение которых не превышает 80 В (напряжение разомкнутой цепи — НРЦ), а ток — 350 А. Максимальная мощность батареи составляет 16,5 кВт, максимальный КПД (с учетом собственных нужд батареи) — 52 %.

В аккумуляторной части установки использованы герметизированные свинцово-кислотные батареи типа AGM (Adsorbed Glass Mate — иммобилизованный в стекловолоконной матрице электролит), предназначенные для применения в системах бесперебойного питания. Батареи допускают глубокий разряд (до 50 % номинальной энергоемкости с сохранением ресурсных характеристик) и работу в режиме так называемого жесткого буфера, когда батарея постоянно подключена к зарядному устройству, а электроды аккумуляторов находятся под повышенным потенциалом. Схема из пяти последовательно соединенных аккумуляторов (энергоемкостью 150 А·ч и рабочим напряжением 12 В каждый) обеспечивает нахождение напряжения БСКА в области рабочих напряжений ЭХГ (52 – 72 В) и при необходимости может обеспечить электрическую мощность 10 кВт в течение 0,5 ч.

Преобразование постоянного напряжения ЭХГ и БСКА в напряжение переменного тока, поступающего к потребителю, осуществляется тремя стандартными однофазными инверторами Xantrex XW 6048 (фирмы “Schneider Electric”) мощностью по 6 кВт. За счет функции зарядного устройства инверторы также могут осуществлять заряд БСКА от электрической сети (220/380 В, 50 Гц) по независимой схеме одновременно со штатным питанием потребителя. Токи и напряжения заряда контролируются собственной системой управления инверторов согласно заданным программным уставкам.

Контроль параметров системы и ее управление осуществляются с помощью устройства интеллектуального управления, выполняющего следующие функции:

измерение электрических параметров основных цепей питания (в том числе напряжений и тока ЭХГ, БСКА и потребителя);

контроль параметров текущего режима работы системы, включая состояние ЭХГ и аккумуляторных батарей;

запуск системы и автоматический вывод ЭХГ на режим;

регулирование выходных параметров ЭХГ и БСКА;

архивирование результатов электрических измерений с возможностью последующей обработки полученной информации.

Схема УИУ построена на основе промышленного контроллера LOGO! компании “Siemens”, а также специально разработанного устройства управления на базе микроконтроллера ARM Cortex M3. Однолинейная

электрическая схема УИУ приведена на рис. 2. Питание контроллера LOGO! и устройства управления осуществляется напряжением 24 В через оригинальный DC/DC-2 конвертор, питаемый от БСКА. Сигналы от датчиков тока и напряжения ( $U_{ЭХГ}$ ,  $I_{ЭХГ}$  и др.) поступают в контроллер, затем выполняются обработка параметров энергосистемы, выбор управляющих воздействий и передача команд управления на силовые контакторы КМ1 – КМ6 по заложенному алгоритму и в соответствии с уставками. Отказ сети моделировали размыканием автоматического выключателя QF. Потребителями электрической энергии в составе экспериментальной системы служили: активная нагрузка переменного и постоянного тока общей мощностью 22 кВт; трехфазные и однофазные двигатели переменного тока ЭД общей мощностью 4,5 кВт.

Одна из основных задач УИУ — плавное перераспределение мощности с БСКА на ЭХГ — выполнялась в автоматическом режиме с помощью оригинальных реохорда сопротивлений и DC/DC-1 конвертора. Последний предназначен для повышения напряжения ЭХГ с целью плавного его вывода на полную мощность потребителя (вывода БСКА на нулевую мощность) и ее поддержания в процессе работы системы.

Сигналом для включения рассматриваемой системы является отсутствие напряжения в сети. Начиная с этого момента, питание потребителя обеспечивает батарея аккумуляторов, напряжение которой подается на вход инвертора после замыкания контактора КМ2, управляемого контроллером (см. рис. 2). Одновременно подается сигнал на активацию и запуск ЭХГ. В него подается водород  $H_2$ , и продувается его анодное пространство. В ходе этого процесса НРЦ достигает номинального значения. После выхода ЭХГ в режим готовности принятия нагрузки (информирует о том ее значении, которое он готов принять) УИУ автоматически плавно переводит мощность с БСКА на ЭХГ до тех пор, пока ток через БСКА не снизится до нуля в пределах установленной погрешности соответствующего датчика тока. Для вывода ЭХГ в режим готовности принятия нагрузки замыкается контактор КМ1, после чего ток через ЭХГ плавно увеличивается сначала за счет уменьшения сопротивления реохорда, а затем за счет повышения напряжения DC/DC-1 конвертора. При этом в процессе работы ЭХГ на потребителя БСКА остается включенной параллельно с ЭХГ, сглаживая возмож-

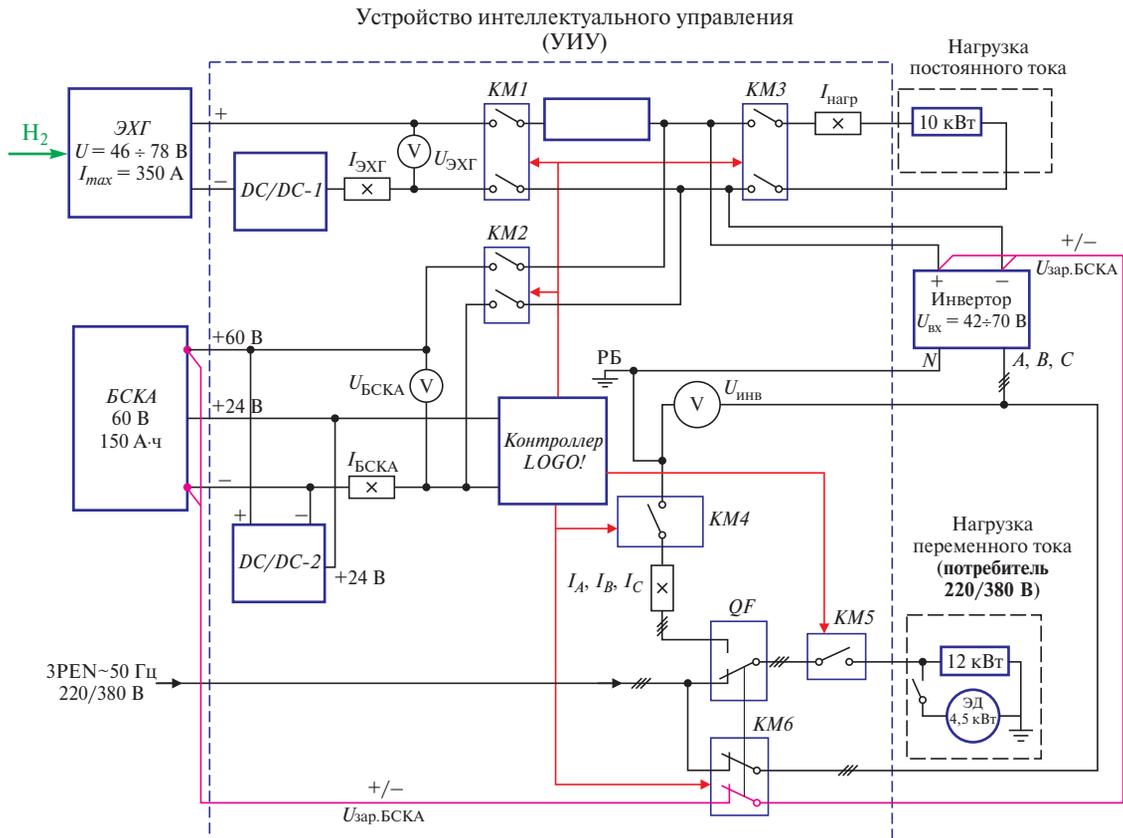


Рис. 2

ные колебания тока, создаваемые, например, пульсирующими нагрузками или при включении реактивных нагрузок (пусковые токи). После появления напряжения во внешней сети ЭХГ отключается от потребителя, а инверторы в автоматическом режиме заряжают БСКА от централизованной электрической сети. Время работы такой системы в автономном режиме определяется главным образом запасом водорода в системе баллонного хранения и мощностью потребителя.

Для проверки технических решений, заложенных в экспериментальную энергетическую систему, а также ее работоспособности в качестве системы бесперебойного и резервного энергоснабжения были проведены исследования:

вольтамперных характеристик БСКА, ЭХГ и работоспособности схемы параллельного включения;

переходных процессов при автоматическом перераспределении мощности между БСКА и ЭХГ в случае изменения мощности потребителя;

работы энергетической системы на пульсирующую нагрузку (электродвигатель плунжерного насоса).

Кроме того, была проконтролирована работа системы в режиме источника бесперебойного питания потребителя при отключении электрической сети (220/380 В, 50 Гц).

Измеренные вольтамперные характеристики как отдельно работающих БСКА и ЭХГ, так и при их параллельном включении представлены на рис. 3, а, из которого видно, что рабочие напряжения ЭХГ находятся в области 52 – 72 В. Область рабочих напряжений БСКА, состоящего из пяти аккумуляторов, уже и составляет 55 – 64 В. В случае параллельной работы БСКА и ЭХГ при каждом значении напряжения такой комбинированной системы ее ток должен равняться сумме токов БСКА и ЭХГ. Небольшое его отличие от результатов, показанных на рис. 3, объясняется тем, что данные экспериментальные кривые получены при неодинаковом заряде БСКА. Из рисунка также видно, что при напряжении системы ЭХГ+БСКА выше НРЦ БСКА (при относительно малой мощности потребителя) вольтамперная характеристика системы повторяет вольтамперную характеристику ЭХГ. При этом необходимо учитывать, что НРЦ БСКА зависит как от текущей степени заряда БСКА, так и от числа отработанных циклов заряда/разряда и общего вре-

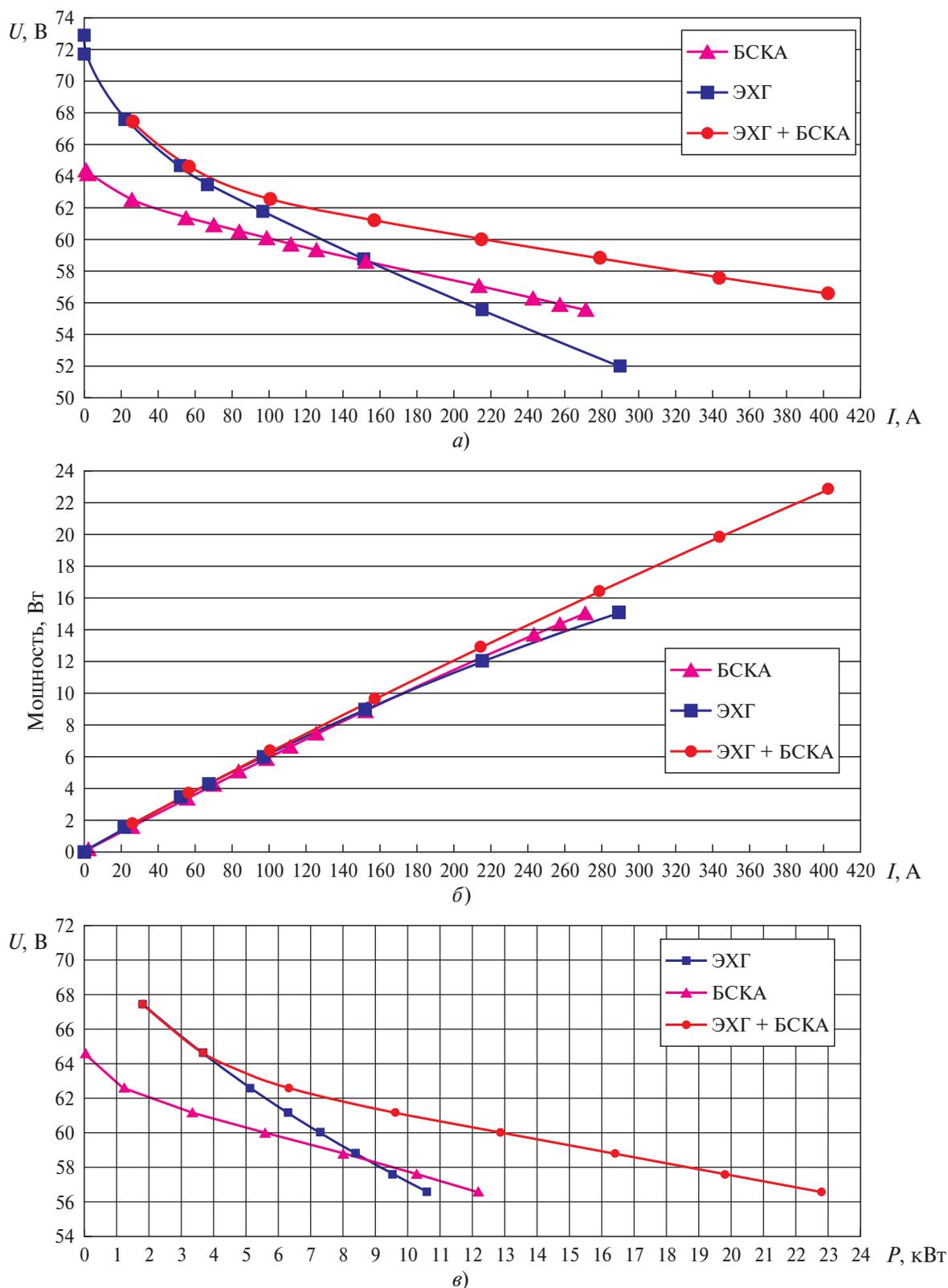


Рис. 3

мени эксплуатации. НРЦ БСКА изменяется от 64,5 В при 100 %-ном заряде до 58 В при 33 %-ном заряде (разряде на 100 А · ч) и до 52 В при 20 %-ном заряде (разряде на 120 А · ч).

На рис. 3, б показаны кривые зависимости мощности от тока, соответствующие приведенным на рис. 3, а вольтамперным характеристикам. С увеличением тока мощность ЭХГ, БСКА и ЭХГ+БСКА непрерывно рас-

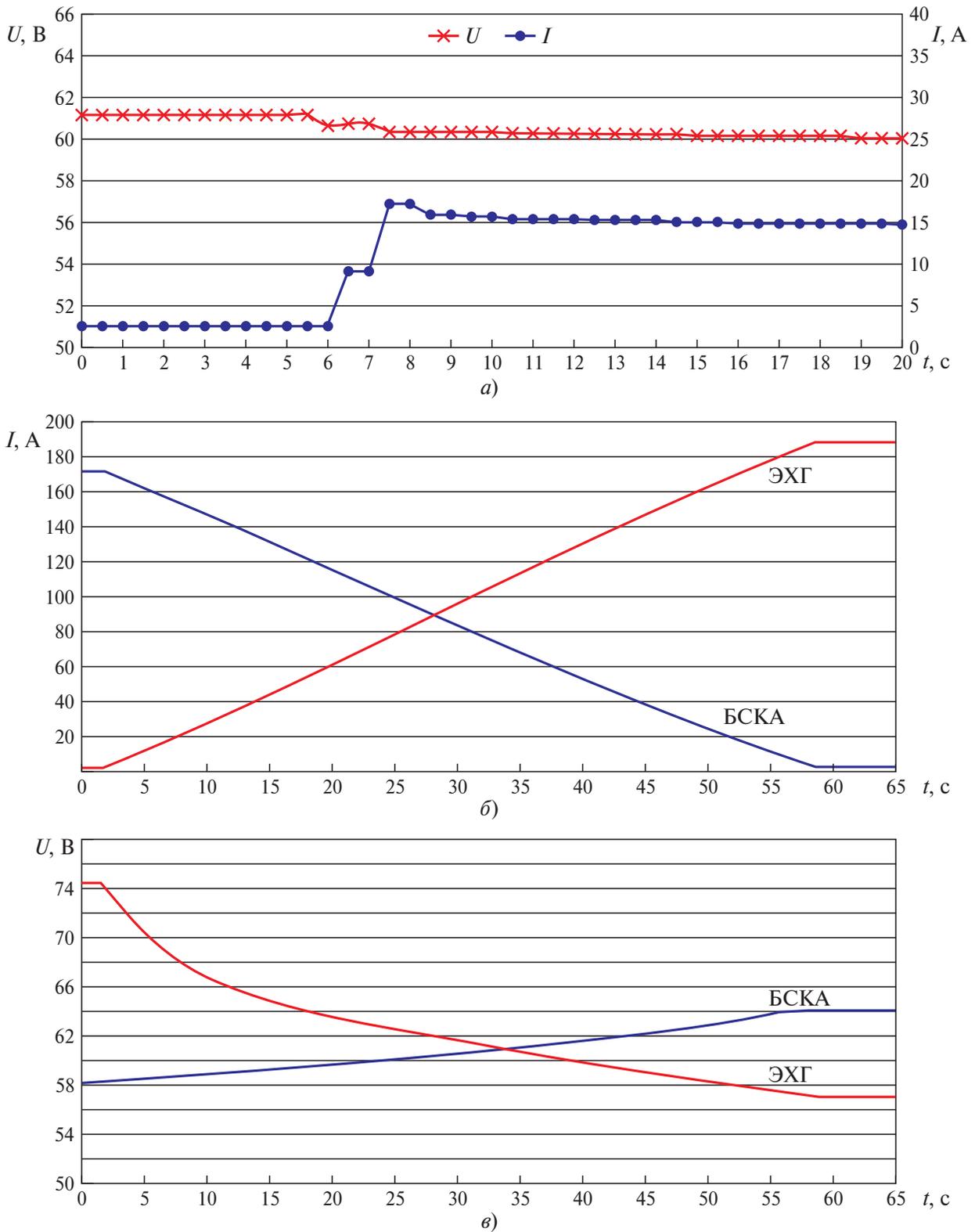


Рис. 4

тет. Пиковая мощность ЭХГ составляет около 16 кВт, пиковая мощность ЭХГ+БСКА может превышать 22 кВт. При необходимости в случае параллельной работы ЭХГ и БСКА эта мощность может генерироваться в течение нескольких десятков минут (конкретное

время зависит от исходного запаса энергии в БСКА).

На рис. 3, в наглядно представлено распределение мощности системы между БСКА и ЭХГ в зависимости от напряжения. При напряжениях, превышающих НРЦ БСКА,

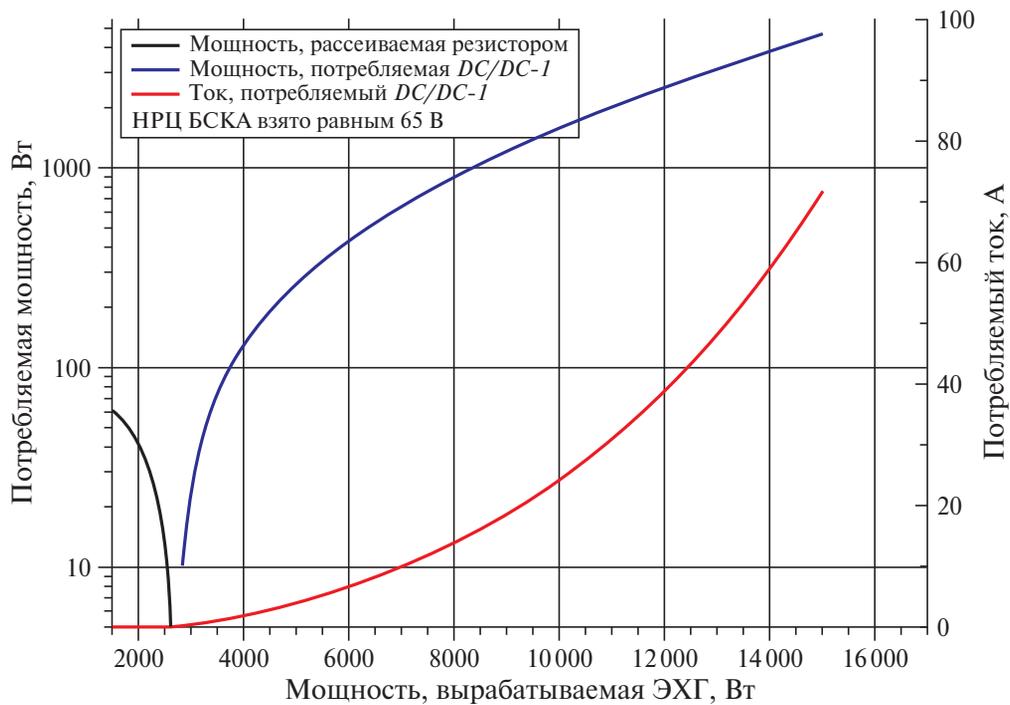


Рис. 5

мощность БСКА равна нулю. С увеличением нагрузки (уменьшением напряжения) рост мощности системы обеспечивается ростом мощности как ЭХГ, так и БСКА. Максимальная мощность системы ЭХГ+БСКА составила в эксперименте (при работе на активную нагрузку) 22,8 кВт, из них мощность ЭХГ — 10,6 кВт, мощность БСКА — 12,2 кВт.

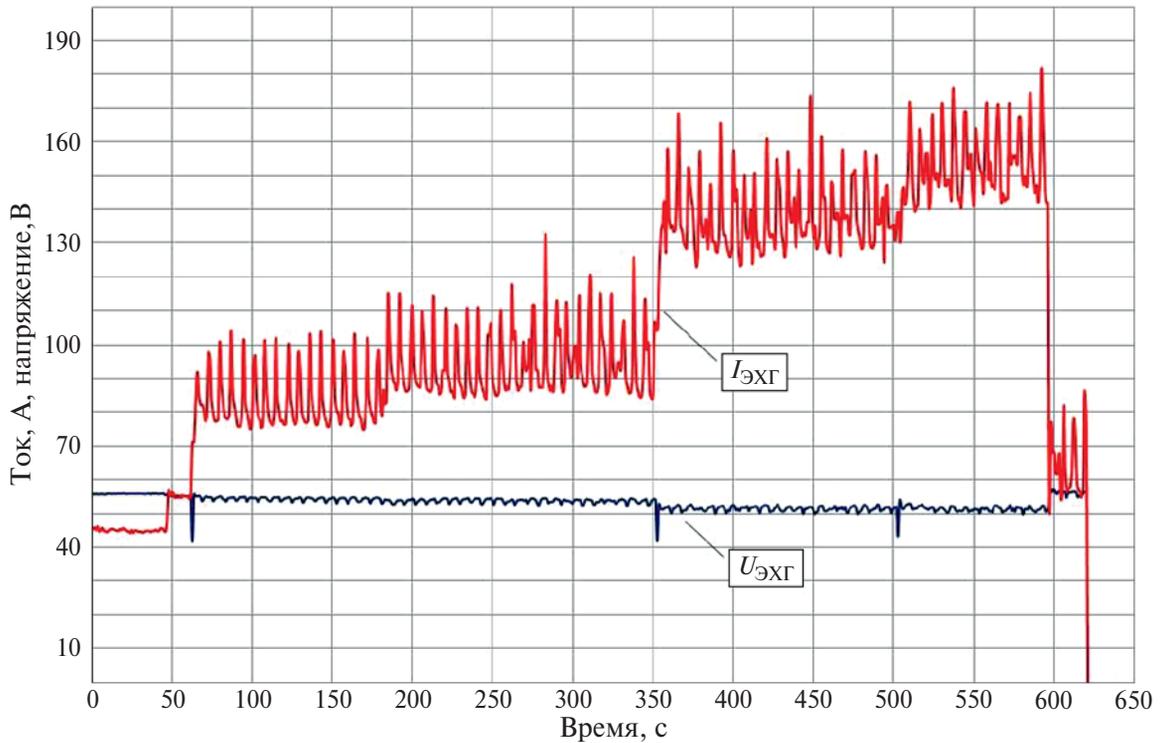
На рис. 4, а приведены результаты эксперимента по отключению внешней электрической сети от потребителя и одновременному переключению его на БСКА. Потребитель представлял собой набор активных и реактивных нагрузок (включенные компьютеры, трехфазный асинхронный двигатель и т. п.). Аварийная ситуация (отключение сети) была смоделирована на 6-й секунде. Уже через 0,5 с (время опроса датчиков тока) энергопитание потребителя начало восстанавливаться за счет БСКА. Стационарные напряжение и ток установились спустя 2,5 с после отключения основной сети.

На рис. 4, б и в представлены соответственно токи и напряжения в системе ЭХГ+БСКА во время плавного перевода мощности с БСКА на ЭХГ. Мощность потребителя составляла около 10 кВт. Вывод на номинальную мощность ЭХГ занял менее минуты. После этого ток через БСКА поддерживался с помощью УИУ вблизи нуля, а напряжение, подаваемое на инверторы, поддерживалось на уровне НРЦ БСКА.

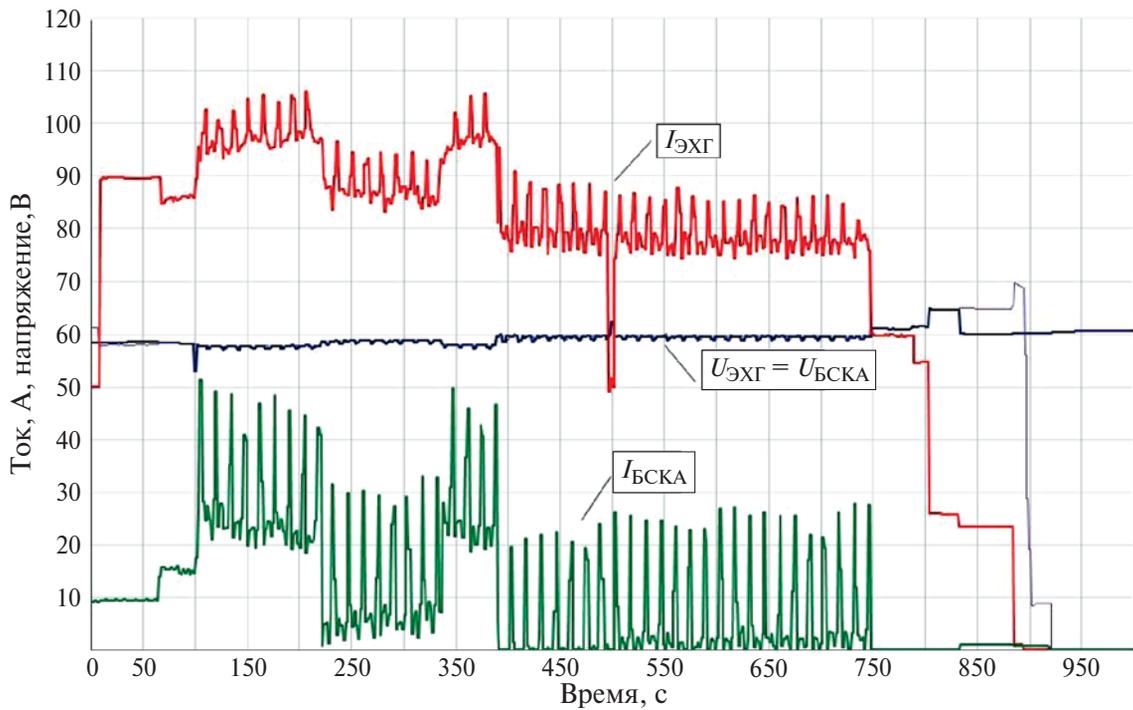
Как уже отмечалось, уровни НРЦ ЭХГ и БСКА различны, что не позволяет осуществлять одновременный запуск этих источников при параллельном соединении без устройства согласования напряжений. Также относительно высокое значение НРЦ ЭХГ (более 70 В) не дает возможности подключить его к входу инвертора, поскольку оно выше допустимого для последнего (64 В). Функцию согласования напряжений ЭХГ и БСКА, а также плавного вывода ЭХГ на номинальный режим выполняют реохорд сопротивлений и *DC/DC-1* конвертор (см. рис. 2).

На рис. 5 представлены кривые зависимости мощности реохорда сопротивлений и *DC/DC-1* конвертора, а также его тока от мощности, вырабатываемой ЭХГ. В начальный момент вывода ЭХГ на требуемый режим его мощность рассеивается на реохорде сопротивлений. Максимальная мощность, рассеиваемая реохордом, — около 60 Вт. *DC/DC-1* конвертор используется для повышения и поддержания напряжения ЭХГ на уровне НРЦ БСКА. Мощность, пропускаемая через *DC/DC-1* конвертор, при мощности ЭХГ 15 кВт составляет около 4,6 кВт. В отличие от сопротивлений мощность, потребляемая *DC/DC-1* конвертором, не рассеивается, а передается потребителю с КПД около 92 % (КПД *DC/DC-1* конвертора).

На рис. 6 приведены осциллограммы тока и напряжения ЭХГ (рис. 6, а) и системы



а)



б)

Рис. 6

ЭХГ+БСКА (рис. 6, б) при нагрузке переменного тока и наличии возмущений, создаваемых электродвигателем плунжерного насоса. Из кривых видно, что при одинаковых токах нагрузки (100 А) амплитуда токовых колебаний ЭХГ меньше при параллельно подключенной БСКА. Колебания тока ЭХГ

составили около 10 А в системе ЭХГ+БСКА, 25 А и более — при самостоятельной работе ЭХГ на нагрузку. Это подтверждает эффективность параллельного подключения ЭХГ и БСКА. Данная схема смягчает условия работы ЭХГ, тем самым увеличивая ресурс его работы.

Коэффициент передачи и преобразования электроэнергии (КПЭ) УИУ и инвертора при параллельной работе ЭХГ и БСКА на различные комбинации нагрузок составил не менее 0,92 (при работе на чисто активную нагрузку переменного тока) и не менее 0,86 (при работе на активную нагрузку переменного тока и ЭД). КПЭ рассчитывали по формуле

$$\text{КПЭ} = (P_{\text{акт}} + P_{\text{ЭД}}) / (P_{\text{ЭХГ}} + P_{\text{БСКА}}),$$

где  $P_{\text{акт}}$  — мощность активной нагрузки переменного тока;  $P_{\text{ЭД}}$  — мощность трехфазных и однофазных двигателей переменного тока;  $P_{\text{ЭХГ}}$  и  $P_{\text{БСКА}}$  — мощности ЭХГ и БСКА.

Комбинация ЭХГ и БСКА позволяет существенно повысить удельные характеристики накопителя. Стандартные водородные баллоны массой 50 кг при давлении 15 МПа содержат 0,54 кг водорода, из которого в ЭХГ с 50 %-ным КПД можно получить 9000 Вт·ч электрической энергии (в расчете на один стандартный баллон). Отсюда следует, что с учетом минимального КПЭ (86 %) удельная энергия такой системы хранения водорода находится на уровне 155 Вт·ч/кг (данное значение указано без учета БСКА и ЭХГ). Для рассмотренной экспериментальной системы, включающей в себя пять стандартных водородных баллонов с начальным давлением 15 МПа и БСКА суммарной емкостью 150 А·ч и номинальным напряжением 60 В, суммарная энергоемкость составила:  $(9000 \cdot 5 + 150 \cdot 60) \cdot 0,86 = 46440$  Вт·ч. При суммарной массе экспериментальной системы около 600 кг ее удельная энергия — около 80 Вт·ч/кг.

Использование баллонов для хранения водорода из композитной стали может увеличить содержание водорода с 1 до 3 % по массе [7]. В таком случае удельная энергия баллонной системы составит 465 Вт·ч/кг, что больше чем на порядок превосходит

удельные характеристики свинцово-кислотных аккумуляторов и в несколько раз превышает показатели литий-ионных аккумуляторов. В экспериментальной системе это увеличило бы ее удельную энергию до 200 Вт·ч/кг.

В заключение следует отметить, что использование энергосистем на основе предложенных технических решений дает возможность решать задачи бесперебойного и резервного энергоснабжения особо ответственных потребителей, существенно увеличить длительность их автономного энергоснабжения без ухудшения экологических характеристик. Модульное исполнение таких систем обеспечивает удобство при транспортировке и монтаже, а также позволяет масштабировать энергетическую установку, увеличивая мощность с 10 кВт до единиц мегаватт, что значительно расширяет область их применения.

### Список литературы

1. **Гибридный** накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р. Н. Бердников, В. Е. Фортов, Э. Е. Сон и др. — Энергия Единой сети, 2013, т. 1.
2. **Norris B. L., Newmiller J., Peek G.** NAS® Battery Demonstration at American Electric Power. A Study for the DOE Energy Storage Program. — Sandia National Laboratories, 2007.
3. **Progress** in electrical energy storage system: A critical review / H. Chen, T. N. Cong, W. Yang and other. — Progress in Natural Science, 2009, vol. 19, № 3.
4. **Коровин Н. В.** Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. — М.: Изд-во МЭИ, 2005.
5. **Shkolnikov E. I., Zhuk A. Z., Vlaskin M. S.** Aluminum as energy carrier: Feasibility analysis and current technologies overview. — Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, vol. 15, № 9.
6. **Vlaskin M. S., Shkolnikov E. I., Bersh A. V.** Oxidation kinetics of micron-sized aluminum powder in high-temperature boiling water. — International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, № 11.
7. **Larminie J., Lowry J.** Hydrogen Supply. — Electric Vehicle Technology Explained: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

dset2009@gmail.com