

На правах рукописи



Кузьмин Иван Николаевич

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО
ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОТОЧНОГО АККУМУЛЯТОРА**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Научный руководитель: **Лоскутов Алексей Борисович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Н. Новгород).

Официальные

Панфилов Дмитрий Иванович

оппоненты:

доктор технических наук, профессор, научный руководитель АО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (г. Москва)

Землянко Евгений Леонидович

кандидат технических наук, председатель научно-технического комитета Девятого управления Министерства обороны Российской Федерации

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «23» мая 2024 года в 15-00 в аудитории 1313 на заседании диссертационного совета 24.2.345.05 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, корпус 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.345.05.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н.



Д.Ю. Титов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее проработанности. Повышение качества энергоснабжения ответственных объектов инфраструктуры (объекты военного назначения, медицинские учреждения, дата центры и др.) с применением накопителей электрической энергии является важной задачей для современного общества, особенно во время растущего спроса на возобновляемую энергетику. Ввиду того, что генерация от возобновляемых источников энергии непредсказуема и не может контролироваться, аккумулярование энергии и выдача ее в пиковые часы является рациональным выходом. С этой целью необходима разработка систем бесперебойного питания, которые способны поддерживать энергоснабжение объекта на протяжении длительного времени и работать в качестве буфера в периоды избыточной генерации.

В настоящее время системы накопления электрической энергии (СНЭ) (к которым также относятся системы бесперебойного питания на основе проточных аккумуляторных батарей) находят широкое применение в различных отраслях экономики. За рубежом активно внедряются системы бесперебойного питания на основе проточных аккумуляторных батарей и уже на практике доказали снижение капитальных и операционных затрат при их внедрении по сравнению с другими аналогами. По состоянию на 2020 год, по данным Департамента энергетики США (DOE), насчитывается уже более 100 объектов, оснащенных такими системами суммарной мощностью более 300 МВт. При этом основными производителями проточных аккумуляторных батарей являются США и Китай. Доля установленной мощности проточных аккумуляторных батарей по отношению к другим электрохимическим накопителям электрической энергии составляет 10% и с каждым годом увеличивается.

Согласно концепции развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации Минэнерго России, применение систем накопления электрической энергии открывает для экономики России большие перспективы: совокупный эффект (за вычетом инвестиций в установку) может составить к 2025–2035 годам до 750 млрд руб в год.

Максимальный объем российского сегмента рынка систем бесперебойного питания мощностью от 10 кВт к 2025 году может составить 120 млрд. руб в год, что даст экономике России дополнительный эффект (за вычетом инвестиций) в 700 млрд. руб в год.

Таким образом, по предварительным расчетам, сегмент целевых потребителей систем бесперебойного питания на основе проточных аккумуляторных батарей только в

Московской области может составлять от 60 до 100 млн. руб в год, а для России в целом 1.0 – 1.5 млрд. руб в год.

В настоящее время в России отсутствует промышленное производство проточных аккумуляторных батарей, как и систем бесперебойного питания с их использованием. Поэтому актуальна задача создания технологической и производственной основы для разработки и серийного изготовления систем накопления электроэнергии с проточными аккумуляторными батареями и систем бесперебойного питания (СБП) на их основе. Данная диссертация посвящена исследованию процессов накопления электрической энергии в проточных аккумуляторах, разработке и изготовлению опытного образца СБП на основе проточных аккумуляторных батарей номинальной мощностью 10 кВт и энергоемкостью 30 кВт·ч и направлена на решение задачи создания гибридных источников электроэнергии для электроснабжения потребителей критичной инфраструктуры. Исходными данными для разработки были результаты совместных инициативных НИР, проводимых в ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ», в рамках которых разрабатывались и исследовались лабораторные образцы проточных ячеек, а также синтезировались различные виды электролита для них.

Вопросам гибридных источников и накопителей электрической энергии посвящены труды научно-исследовательских институтов, производственных организаций и известных, как отечественных, так и зарубежных исследователей. Среди них Ю.Н. Астахов, М.Г. Асташев, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян, В.В. Елистратов, Н.Л. Новиков, В.Е. Фортов, Д.И. Панфилов, О.С. Попель, Ч.У. Курувита Араччиге, А. Oudalov, Р.А. Dougal, Н.А. Хрипач, Д.А. Петриченко, Чиркин В.Г. и др.

Следует отметить, что практического опыта разработки и исследований в области проточных накопителей электроэнергии практически нет. Возможно, представленная работа даст возможности для создания промышленного образца гибридного источника и накопителя, в которых нуждаются критические инфраструктуры систем электроснабжения. Практика эксплуатации особо ответственных систем показывает, что уровень бесперебойности предъявляет возрастающие требования, а мощность критических потребителей растет.

Проведенные работы позволили создать первую в России СБП на основе проточных аккумуляторных батарей с возможностью масштабирования мощности и емкости, с использованием силового электрооборудования отечественного производства. Кроме того, получение собственного электролита позволило обеспечить удельную энергоемкость на уровне лучших мировых производителей.

Стенд для испытаний проточной аккумуляторной батареи мощностью 5 кВт позволил получить уникальные данные для технологического проектирования схем

силовой электроники, а также схем управления и алгоритмов для гибридных источников и накопителей электрической энергии на основе проточных аккумуляторных батарей, в частности СБП-ПАКБ-10/30.

Объект исследования – системы бесперебойного питания (СБП) нового поколения на основе проточных аккумуляторных батарей.

Цель работы – разработка и экспериментальная апробация научно-технических решений по созданию буферного накопителя электрической энергии на основе проточного аккумулятора с системой управления на базе новых алгоритмов для распределенной генерации совместно с ВИЭ и другими альтернативными источниками, работающими параллельно с централизованной электрической сетью.

Научная новизна работы заключатся в разработке моделей и технологических решений, позволивших реализовать ванадий-кислотный (VRFB) накопитель электроэнергии проточного типа.

В результате работы предложен уникальный программно-аппаратный комплекс дистанционного мониторинга и управления буферным накопителем электрической энергии на основе VRFB аккумулятора, работающего параллельно с централизованной электрической сетью, с использованием алгоритмов для автоматизации его работы, в зависимости от генерации энергии, нагрузки потребителя и технического состояния, в целях повышения КПД системы накопления энергии.

В результате исследований впервые создан и исследован экспериментальный образец буферного накопителя электрической энергии на основе проточного аккумулятора мощность 5 кВт с системой управления, которая способна комплексно получать и анализировать информацию о нагрузке и выработке электрической энергии, самостоятельно принимать решения о необходимости накопления и выдачи электрической энергии, выступать в качестве автоматической балансировки и самодиагностики текущего и прогнозируемого технического состояния накопителя электрической энергии.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены следующие **основные задачи**:

1. Анализ систем бесперебойного питания нового поколения на основе проточных аккумуляторных батарей
2. Исследование влияния конструкции, характеристик и компонентов накопителей электрической энергии на их эффективность и работу систем бесперебойного питания в целом.
3. Моделирование и разработка схем преобразования параметров электрической энергии для специализированных источников.

4. Математическое описание и алгоритмы управления систем электроснабжения со специализированными источниками питания

5. Экспериментальные исследования режимов работы специализированных источников в системах электроснабжения с развитой инфраструктурой.

Теоретическая значимость работы.

Проведено математическое моделирование в программе COMSOL Multiphysics различных конструкций ячейки проточного аккумулятора.

Разработана методика получения электролита на основе пентаоксида ванадия в серной кислоте, эквивалентного по составу зарубежному электролиту «Vanadium Electrolyte Solution 1.6 M», производимому компанией GfE Gesellschaft für Elektrometallurgie mbH (Германия).

Полученные расчетные и экспериментальные зависимости являются закономерностями для проточных накопителей и могут использоваться в системах управления, а также в расчетных методиках создания гибридных систем.

Практическая значимость работы.

Разработан Патент РФ № 191123 «Ячейка проточного аккумулятора». Дата заявки: 09.04.2018.

Разработан аппаратно-программный комплекс управления проточным накопителем, который представляет собой систему управления проточной аккумуляторной батареей на основе программного обеспечения *L-CARD E-502* и *LabVIEW*.

Разработан графический интерфейс в среде *CODESYS* с визуализацией состояния элементов управления и параметров текущих режимов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Система бесперебойного питания нового поколения на основе проточных аккумуляторных батарей.

2. Конструкции и характеристики компонентов накопителей электрической энергии, которые определяют эффективность и работы систем бесперебойного питания в целом.

3. Модели и схемные решения преобразования параметров электрической энергии проточных аккумуляторных батарей в составе систем бесперебойного питания.

4. Алгоритмы управления систем проточных аккумуляторных батарей в составе СБП.

5. Экспериментальные исследования режимов работы, проведенные на физическом стенде позволяющем создавать реальные нагрузки систем электроснабжения с развитой инфраструктурой.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликованы 6 печатных работ, входящих в список ВАК РФ, в наукометрические индексируемые базы РИНЦ, Scopus (WoS), в том числе патент на полезную модель.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались: на заседаниях кафедры электроэнергетики и силовой электроники Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, на заседаниях технического совета производственного объединения «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» (ЗАО «МПОТК»).

Личный вклад автора в получение результатов диссертационной работы.

Личный вклад автора заключался в постановке основных задач исследований, в разработке и создании экспериментальных установок, в разработке и апробации алгоритмов и программ. Некоторый объем работ выполнялся совместно с сотрудниками производственного объединения «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» (ЗАО «МПОТК»).

Автор выражает благодарность сотруднику производственного объединения «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» (ЗАО «МПОТК») к.т.н. Осетрову Е.С. за ценные советы и замечания.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 80 наименований, 4 приложений. Содержание работы изложено на 146 страницах, включая 6 таблиц и 43 иллюстраций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассматриваются вопросы построения и функционирования систем бесперебойного питания нового поколения на основе проточных аккумуляторных батарей.

Потребитель энергии сталкивался с внезапными отключениями электроэнергии, скачками напряжения в сети, выводящими из строя дорогостоящее электрооборудование. Даже внутри объекта могут быть потребители различных категорий, требующие разного подхода к системе энергообеспечения.

Для обеспечения бесперебойности на объектах требующих постоянного электропитания, как правило, применяют два независимых источника электроснабжения. При наличии особой группы потребителей, устанавливают ещё и резервный источник электроэнергии. В зависимости от периодов отключения электроэнергии выстраивается бесперебойная система электроснабжения, при этом качество подаваемой электроэнергии не должно изменяться. Для этого в систему электроснабжения устанавливают источник

бесперебойного питания (ИБП) или автоматический ввод резерва (АВР), которые позволяют в период отключения электроэнергии выполнить качественный переход на

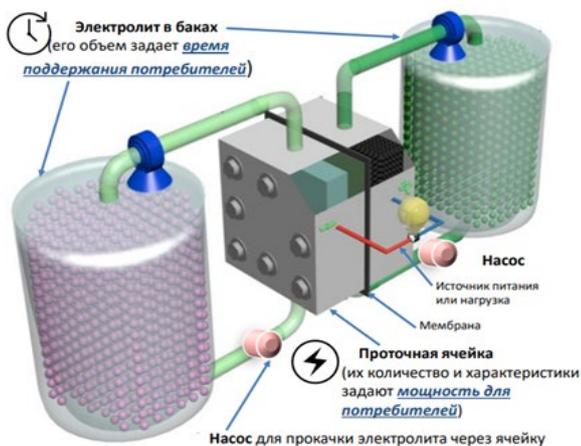


Рисунок 1 – Проточная ячейка

линию резервного питания. Для этого в состав ИБП вводят накопитель энергии: либо аккумуляторы; либо суперконденсаторы; либо механические накопители энергии; либо др. Основным элементом проточного аккумулятора, в частности ванадий-кислотного (VRFB), является проточная ячейка (рисунок 1), где из-за необходимости прокачивания электролита через пористый углеродный электрод теряется часть мощности из-за гидросопротивления материалов.

Одним из подходов к уменьшению гидродинамического сопротивления стало изменение конструкции биполярных пластин, которые по предлагаемой конструкции должны включать в себя змеевидный канал, а обмен электролита с пористым углеродным материалом осуществляется за счет диффузии ионов, осмотического давления и турбулентных потоков на границе, где протекающий по каналу электролит соприкасается с пористым углеродным электродом.

Классической конструкцией ячейки проточного аккумулятора с новой модификацией является змеевидный канал и рассматривается влияние параметров (глубина, ширина, количество каналов) на гидродинамическое и электрическое сопротивление ячейки.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики известных накопителей электрической энергии. Достоинством VRFB являются: долговечность, неограниченность батарей по мощности, допустимость 4-х кратной перегрузки, низкий уровень саморазряда, пожаробезопасность и низкая стоимость.

К недостаткам VRFB можно отнести: сложность системы управления, малая плотность хранения энергии, что приводит к увеличению веса и габаритов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики известных накопителей

Технологии	Мощность, МВт	Время использования	Саморазряд, % в сутки	Удельная плотность энергии, Вт·ч/кг	Объемная плотность энергии, Вт·ч/л	Удельная мощность, Вт/кг	Эффективность, %	Продолжительность жизни, циклы (не менее чем)
Электрохимический								
Свинцово-кислотный	0.001–50	s–3 h	0.1–0.8	30–50	50–80	75–300	70–90	500–1200
Литий-ионный	0.1–100	min–h	0.1–0.3	75–270	200–600	100–10000	85–98	1000–25000
Никель-кадмий	0.1–50		0.2–1	50–75	60–150	150–230	60–90	1000–2500
Никель-металлогидрид	0.01–1		0.5–1	40–110	220–428	250–2000	50–80	200–1500
Натриево-серная батарея (NaS)	0.05–100	s–h	0.05	150–300	150–300	150–230	70–90	2000–5000

Ванадиевая окислительно-восстановительная батарея	0.1–200	s–10 h	0.06	10–75	20–70	80–150	60–90	12000–14000
Цинк-бромная проточная батарея	up to 1	s–10 h	0.06	60–85	30–60	50–150	75–80	2000
Электрический								
Суперконденсатор (СК)	0.01–1	ms–s	2–4	1.5–110	40–100	40000–120000	80–98	10000 – 100000
Сверхпроводящий магнитный накопитель энергии (SMES)	0.001–10	s	0	1–60	up to 10	(10000–100000) x10 ³	80–95	100 000
Механический								
Гидроаккумулирующая электростанция (ГЭС)	20–5000	1–24 h	0–0.5	0.3	0.2–2	0.1–0.2	70–85	30–60 years
Аккумулятор энергии сжатого воздуха (CAES)	10–1000	1–24 h	0–10	10–30	0.5–0.8 (at 60 bar)	0.2–0.6	40–75	20–40 years
Маховик (FES)	0.002–400	s–min	1.3–100	5–200		1000–5000	70–95	20000–100000
Химические								
Водород (H ₂)	0.01–1000	s–months	0–4		600	0.2–20	25–82	5–10 years
Синтетический природный газ (SNG)	50–1000	s–months	0–1		1800	0.2–2	25–56	30 years

В настоящее время системы накопления электрической энергии (СНЭ) (к которым также относятся системы бесперебойного питания на основе VRFB) находят широкое применение в различных отраслях экономики.

Проточные аккумуляторы, способные на накопление больших объемов электроэнергии, могут применяться в закрытых помещениях. При этом мощность (зависящая от площади электродов), энергоемкость (зависящая от объема электролита) могут подбираться и наращиваться в процессе эксплуатации с учетом требований конкретных потребителей. К недостаткам проточных аккумуляторов можно отнести низкую плотность энергии. Также сложная конструкция гидродинамической системы, требующая периодического обслуживания локального источника электроэнергии.

Однако, несмотря на имеющиеся недостатки, проточные аккумуляторы являются перспективной технологией накопления электроэнергии в составе локальных источников для критически важных инфраструктурных потребителей. Для обеспечения надежного электроснабжения критически важных инфраструктурных потребителей применяются локальные источники электроэнергии, работающие в условиях отключения электроэнергии от внешней электрической сети. В современных условиях локальные источники должны соответствовать широкому перечню требований: высокая эффективность, простота реализации, быстрый запуск, высокая адаптивность к изменениям нагрузки, отсутствие шума, отсутствие тепловых выбросов, взрывобезопасность и т.д.

Известные аккумуляторы (таблица 1), в том числе топливные элементы могут работать в составе гибридной системы электроснабжения и удовлетворяют требованиям по автономности. Однако применение топливных элементов ограничивается рядом технических барьеров, связанных с хранением запаса топлива (водорода), особенностью внешних характеристик (мягкая вольт-амперная характеристика), необходимость мониторинга и обслуживания.

На основе анализа передовых разработок возможен подход к возможному сочетанию нескольких технологий для создания локальных источников, обеспечивающих надежное

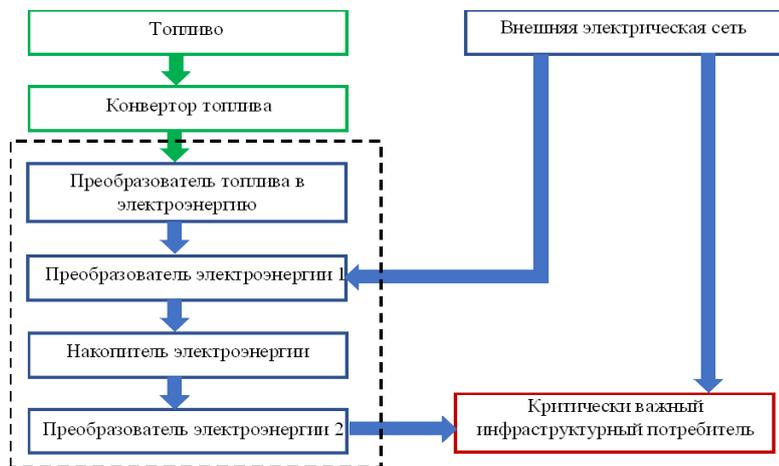


Рисунок 2 – Структура локальных источников на основе преобразователей топлива.

электроснабжение объектов критической инфраструктуры (рисунок 2).

Систему накопления больших энергий целесообразно реализовать на основе проточных аккумуляторов.

Целесообразно, также, выполнять такую систему по принципу модульности. Каждый модуль должен иметь собственную систему

управления (первого уровня) для управления зарядом / разрядом накопителей. Также потребители и модули локального источника, а также внешняя электрическая сеть должны быть связаны единой системой управления (второго уровня). Функции системы управления второго уровня заключаются в определении и задании оптимальных режимов работы, загрузки отдельных модулей.

Благодаря проведенному сравнительному анализу можно сделать вывод о целесообразности использования ПАКБ в сочетании с ВИЭ и другими альтернативными источниками энергии для накопления больших объемов электроэнергии дают высокую энергоэффективность. Кроме того, накопленные объемы электроэнергии в ночные часы работы энергосистемы, когда тарифы минимальны, могут быть использованы в периоды максимальных нагрузок при дефиците мощности и высоких тарифах с целью выравнивания суточных графиков электропотребления в сетях общего назначения.

Вторая глава посвящена разработке исследованию влияния характеристик и конструкции накопителей электрической энергии на эффективность работы

Основным элементом проточного аккумулятора является протонообменная ячейка, конструкция которой определяет все характеристики аккумулятора. С целью исследования процессов в протонообменной ячейке проводилось математическое моделирование различных конструкций и режимов. Математическое моделирование проводилось в среде e COMSOL Multiphysics. Целью данного исследования является сравнение 2-х различных

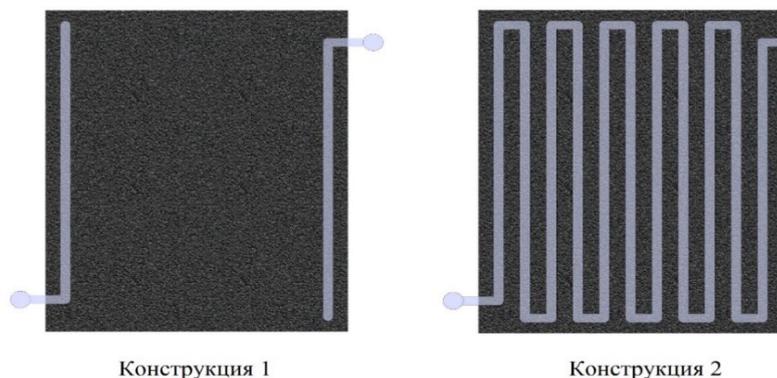


Рисунок 3 – Вид проточных полужеек различной конструкции

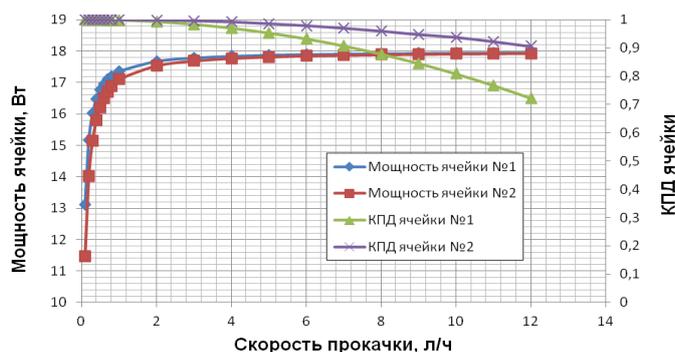


Рисунок 4 – Кривые зависимости мощностей ячеек и их КПД от скорости течения электролита через ячейку

конструкций ячейки проточного аккумулятора. На рисунке 3 представлены модели полужеек, в которой моделируется течение жидкости по каналу.

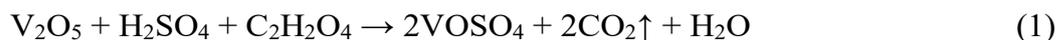
Рассмотренные конструкции определяют не только эффективность самих ячеек, но и энергетические затраты на прокачку электролита, что сказывается на общей эффективности накопителя ПАКБ.

На рисунке 4 приведены кривые мощностей ячеек и их КПД в зависимости от скорости течения электролита через ячейку с учетом потерь на электрическое сопротивление

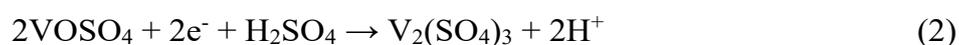
(т.к. электрический контакт в случае со змеевидным каналом хуже, чем в случае сплошной пластины). Видно, что мощность в зависимости от скорости течения электролита для конструкции № 1, изменяется практически так же, как и для конструкции № 2. При этом КПД в ячейки конструкции № 1 падает с увеличением скорости протекания электролита более существенно, чем для ячейки конструкции № 2, что связано с более сильным увеличением гидросопротивления по сравнению с ячейкой со змеевидным каналом. Таким образом, конструкция ячейки проточного аккумулятора со змеевидным каналом является более приемлемой с точки зрения снижения потерь на гидродинамическое сопротивление. Предложенная конструкция проточной ячейки запатентована (Патент РФ № 191123 «Ячейка проточного аккумулятора»).

Другой важной задачей является приготовление электролита. На первой стадии приготовления электролита проводится восстановление пентаоксида ванадия (V_2O_5) в растворе серной кислоты с использованием восстановителей (щавелевой кислоты). При

этом получается раствор сульфата ванадила (VOSO_4) в растворе серной кислоты. Восстановление протекает согласно формуле (1).



На второй стадии проводится электрохимическое восстановление электролита. Электролит заливается в стенд для зарядки электролита в соотношении 2:1 в бак отрицательного и положительного электролита соответственно. Заряд проводится, пока в баке отрицательного электролита не образуется смесь сульфата ванадила и сульфата (III) ванадия в пропорции 1:1. В баке отрицательного и положительного электролита протекают процессы восстановления и окисления соответственно. Восстановление протекает согласно формуле (2), а окисление – формуле (3).



После этого электролит из бака с отрицательным электролитом перекачивается в бак для хранения готовой продукции, а электролит из положительного бака перекачивается обратно в реактор для повторного восстановления.

Предложена методика получения электролита и конструкция реактора на основе пентаоксида ванадия в серной кислоте, эквивалентного по составу зарубежному электролиту «Vanadium Electrolyte Solution 1.6 M», производимому компанией GfE Gesellschaft für Elektrometallurgie mbH (Германия).

Разработан алгоритм определения мощности ячейки проточного аккумулятора в зависимости от скорости течения электролита и на основании результатов мощности ячейки проведено сравнение 2-х конструкций ячейки проточного аккумулятора. По результатам сравнительной оценки наиболее перспективной является конструкция проточной ячейки со змеевидным каналом для протекания электролита, т.к. в этом случае величина гидродинамических потерь сравнительно ниже. Данные исследования были необходимы для разработки алгоритмов мониторинга и управления работы насосов перекачки электролитов в стеке ПАКБ.

В **третьей главе** представлено моделирование разработки схем преобразователей параметров электрической энергии для гибридных специализированных источников.

В данной главе рассмотрен модульный принцип построения проточных накопителей энергии.

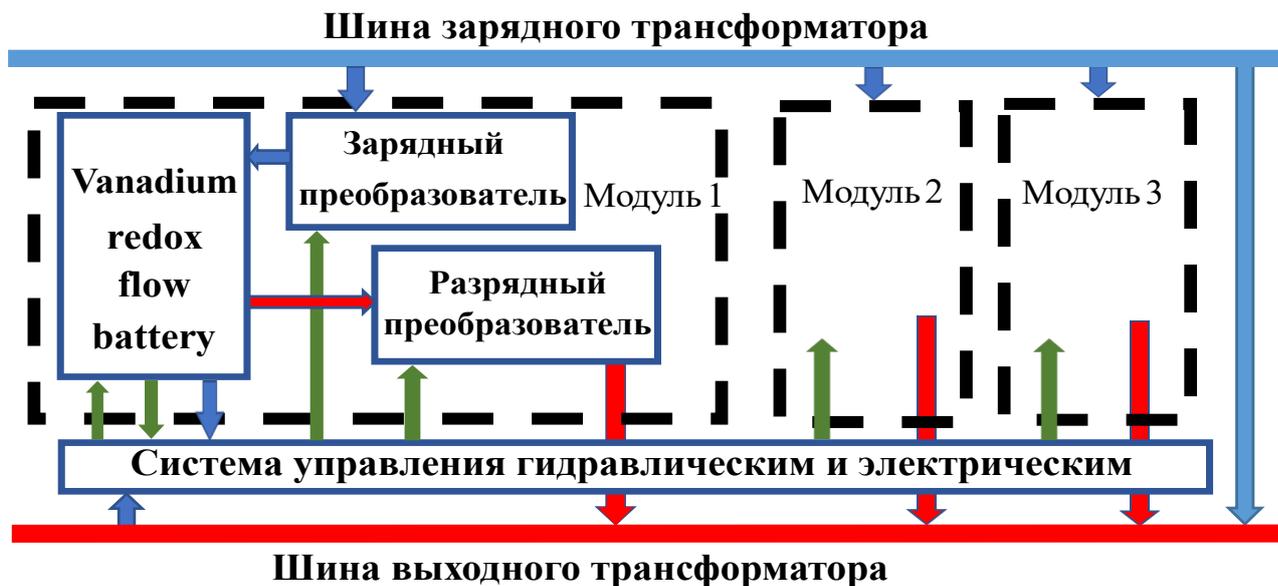


Рисунок 5 - Модульная структура системы включения и управления проточных накопителей

Для модульной структуры важным является согласование разрядных характеристик. Были получены разрядные характеристики двух стеков при их последовательном включении, которые приведены на рисунке 6.

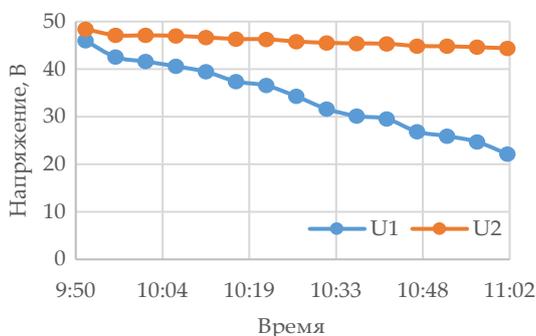


Рисунок 6 – Разрядные характеристики стеков 1 и 2.

Несмотря на одинаковые номинальные характеристики стеков и общую гидродинамическую систему подачи электролита, одинаковые условия разряда, уровень начального заряда (SOC) скорость снижения напряжения стеков существенно различается. Наблюдается существенное различие в их напряжении, которое увеличивается по мере разряда, достигая 22,27 В или

41,7% от начального заряда ячеек. Причины такого различия могут быть следующие:

1. Внутреннее сопротивление стека. Сопротивления могут различаться из-за неидеальности конструктивных и электрохимических параметров стеков (толщина и размеры, плотность и структура электродов и т.д.). В процессе эксплуатации стеков может наблюдаться изменение внутреннего сопротивления и снижение эффективности их работы из-за влияния деградации протонной мембраны и/или электродов. Степень деградации зависит от количества часов наработки стеков и условий их эксплуатации.

2. Скорость прокачки электролита. При наличии единой гидродинамической системы для обоих стеков возникают трудности поддержания одинаковой скорости прокачки электролитов, вызванные невозможностью точной ручной настройки.

Следовательно, включать стеки на параллельную работу без дополнительных преобразователей нельзя. Работа такой системы является неэффективной, и приведет к перегрузке стека № 2, а значит, требуется применять специальные способы для объединения нескольких ячеек в общую систему.

Для поддержания одинаковой скорости прокачки электролита через параллельно подключенные стеки можно использовать независимую гидродинамическую систему с собственными баками с электролитом для каждого топливного стека. Настройка скорости подачи электролита в таком случае будет поддерживаться с помощью насосов и контролироваться датчиками расхода. Однако данный способ ведет к дополнительным затратам, как на материалы и оборудование, так и на отводимую площадь под размещение баков.

На рисунке 7 представлена общая гидродинамическая схема, позволяющая

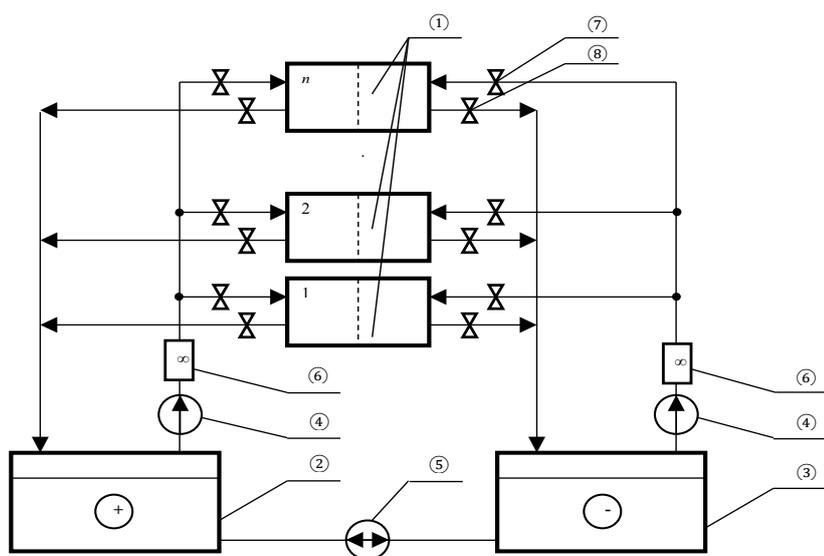


Рисунок 7 – Гидродинамическая схема для подключения нескольких проточных стеков: 1 – стек проточной батареи (n штук); 2 и 3 – баки с электролитом; 4 – основные насосы прокачки электролита; 5 – балансирующий насос; 6 – датчики расхода электролита; 7 – входные вентили; 8 – выходные вентили

2. Осуществляется настройка скорости прокачки используя входные вентили 7 и контролируя расход с помощью датчиков 6. При достижении необходимой скорости, перекрывается выходные вентили 8.

3. выполняется настройка для следующего стека. Этап 2 повторяется необходимое количество раз для настройки всех параллельных стеков.

подключить к общему объему баков с электролитом неограниченное количество проточных стеков. Однако, это требует особой настройки гидросистемы.

Настройка одинаковой скорости прокачки электролита осуществляется в следующем порядке:

1. С помощью запорных вентилей 7 от системы подачи электролита отключаются все стеки кроме настраиваемого.

Для объединения стеков и выравнивания их выходного напряжения необходимо использовать двунаправленные DC/AC преобразователи на основе мостового инвертора. Требуемый уровень напряжения на выходе инвертора обеспечивается с помощью трансформатора, который есть в системе бесперебойного питания.

На рисунке 8 приведена предлагаемая схема, позволяющая объединить проточные

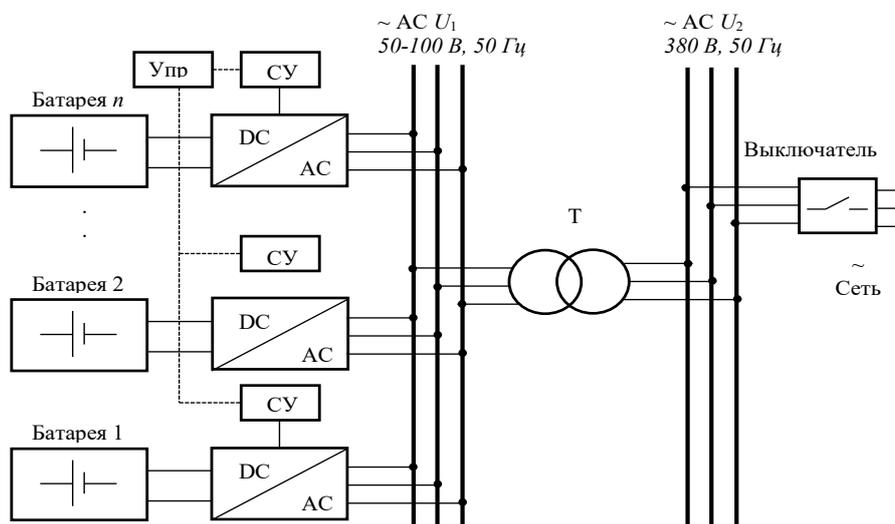


Рисунок 8 – Функциональная схема объединения стеков и их преобразователей на параллельную работу.

стеки на параллельную работу на стороне переменного напряжения. Для преобразования постоянного напряжения в переменное используется двунаправленный трёхфазный мостовой DC/AC преобразователь.

После DC/AC преобразователей устанавливается

трехфазный трансформатор Т для дальнейшего преобразования напряжения до уровня, необходимого потребителю. Также он обеспечивает гальваническую развязку между ячейкой и сетью. На вторичной стороне трансформатора расположена шина переменного напряжения, к которой подключаются потребители.

Управление системой и DC/AC преобразователями осуществляется системой управления, состоящей из двух модулей: единая система задания сигнала управления и собственные блоки управления преобразователями. Единая система управления необходима для синхронизации выходного напряжения преобразователей и управлением потоком мощности накопителей в сеть (из сети в режиме заряда). Собственные блоки управления преобразователями CS служат для генерации сигналов ШИМ для формирования выходных напряжений преобразователей и выравнивания амплитуд напряжений блоков накопителей.

Для тестирования работоспособности предложенной схемы была разработана имитационная модель в Matlab Simulink. На Рисунке 9 приведен график изменения напряжения при параллельном соединении трех стеков проточных аккумуляторов с помощью предложенной схемы.

При объединении стеков проточных аккумуляторов на параллельную работу наблюдается различия ВАХ, что приводит к неэффективной работе ПАК.

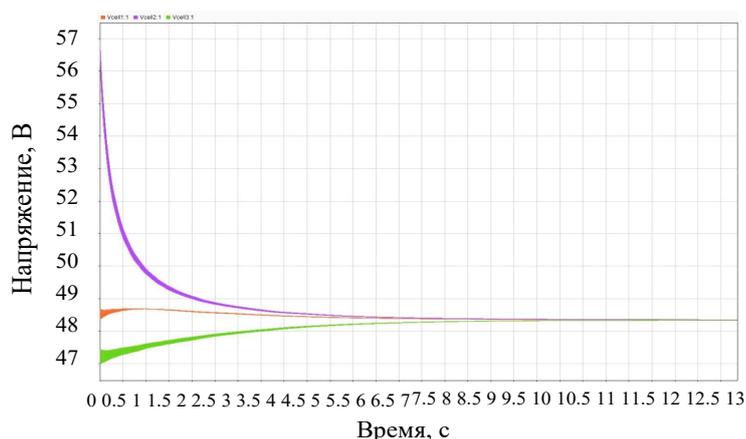


Рисунок 9 – Изменение напряжения ячеек при их параллельном соединении.

Как видно, начальный заряд ячеек отличался, причем максимальная разница достигает 8,5 В, или ~18% от номинального значения напряжения стека. Системе управления потребовалось 10 с для выравнивания напряжения всех стеков. Таким образом, для создания систем накопления большой мощности на основе

проточных аккумуляторов требуется объединение стеков в общую систему.

Технологической основой для использования проточных аккумуляторов в составе системы бесперебойного питания стала система СБП «ДУБНА» (рисунок 10), которая выпускается серийно.

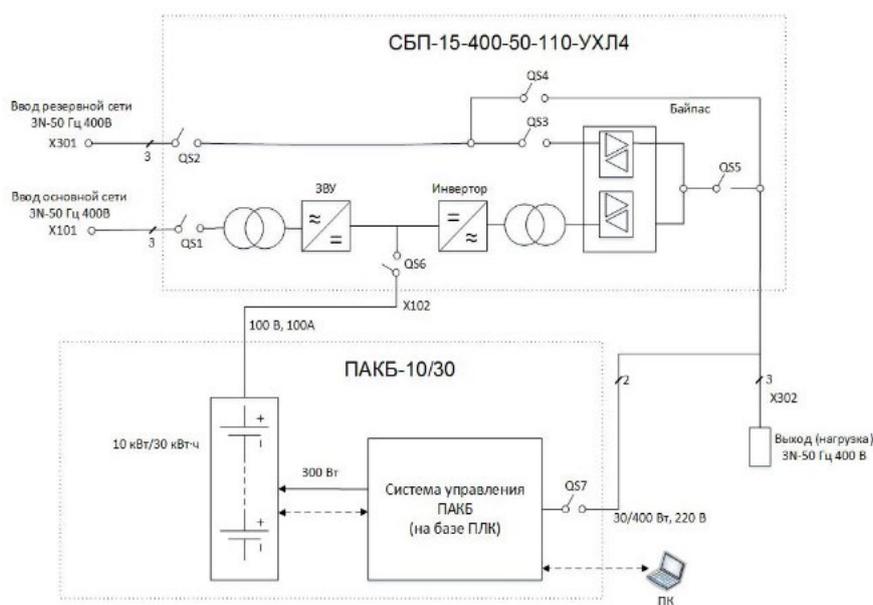


Рисунок 10 – Система бесперебойного питания СБП «ДУБНА»

В четвертой главе рассматривается математическое описание и алгоритмы управления систем электроснабжения со специализированными источниками питания. Кроме того представлены экспериментальные исследования режимов работы специализированных источников в системах электроснабжения критической инфраструктуры.

Экспериментальные оценки влияния скорости прокачки электролита на характеристики стека приведены на рисунке 11.

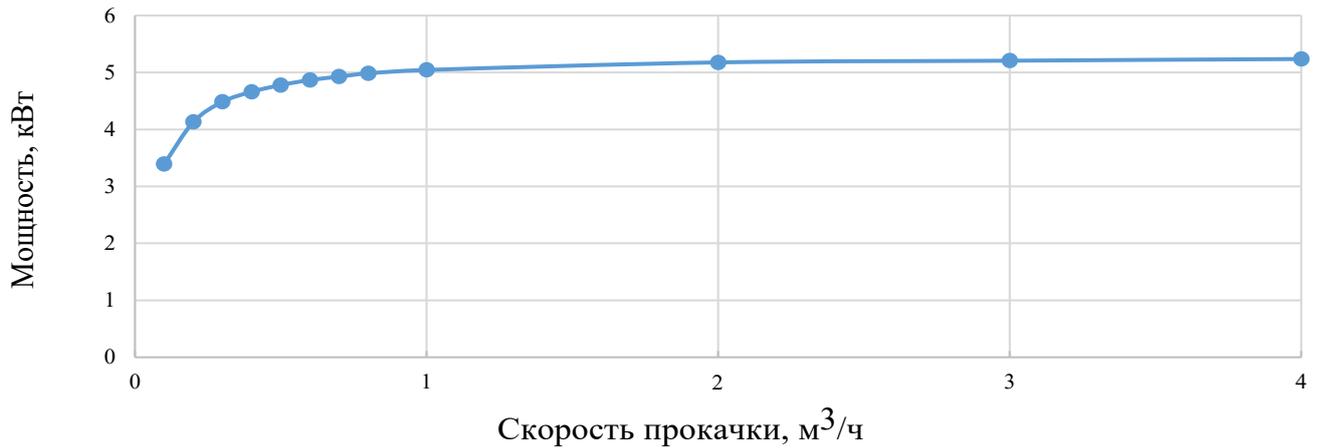


Рисунок 11 – Зависимость мощности стека от скорости течения электролита.

При низких скоростях прокачки электролита (до 1 м³/ч), скорость оказывает существенное влияние на мощность стека. После достижения скорости прокачки электролита 1 м³/ч мощность стека изменяется незначительно от скорости течения электролита. Таким образом, скорость прокачки электролита может существенно влиять на его выходные характеристики и эффективность его работы.



Рисунок 13 – Стенд проточного аккумулятора, зарядное устройство и система управления стендом

Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик проводились на стенде проточного аккумулятора, зарядного устройства, системы управления стендом и системы управления нагрузочных элементов. Как видно из рисунка 14, в течение первых 6 минут происходил заряд ячейки с ограничением тока на уровне 150 А (максимально допустимая величина тока стека по данным производителя). Далее при снижающемся токе

заряда поддерживалось напряжение на уровне 58 В. Полное время заряда составило 30 минут, после чего ПАКБ была отключена от зарядного устройства и переключена на нагрузку. Из рисунка 14 б, в, следует, что в начале разряда пиковая мощность стека достигла 8 кВт, а максимальная величина тока – 150 А. При этом падение напряжения (с 58 В до 44 В), вызванное достаточно большим внутренним сопротивлением ячеек ПАКБ (0,07 Ом).

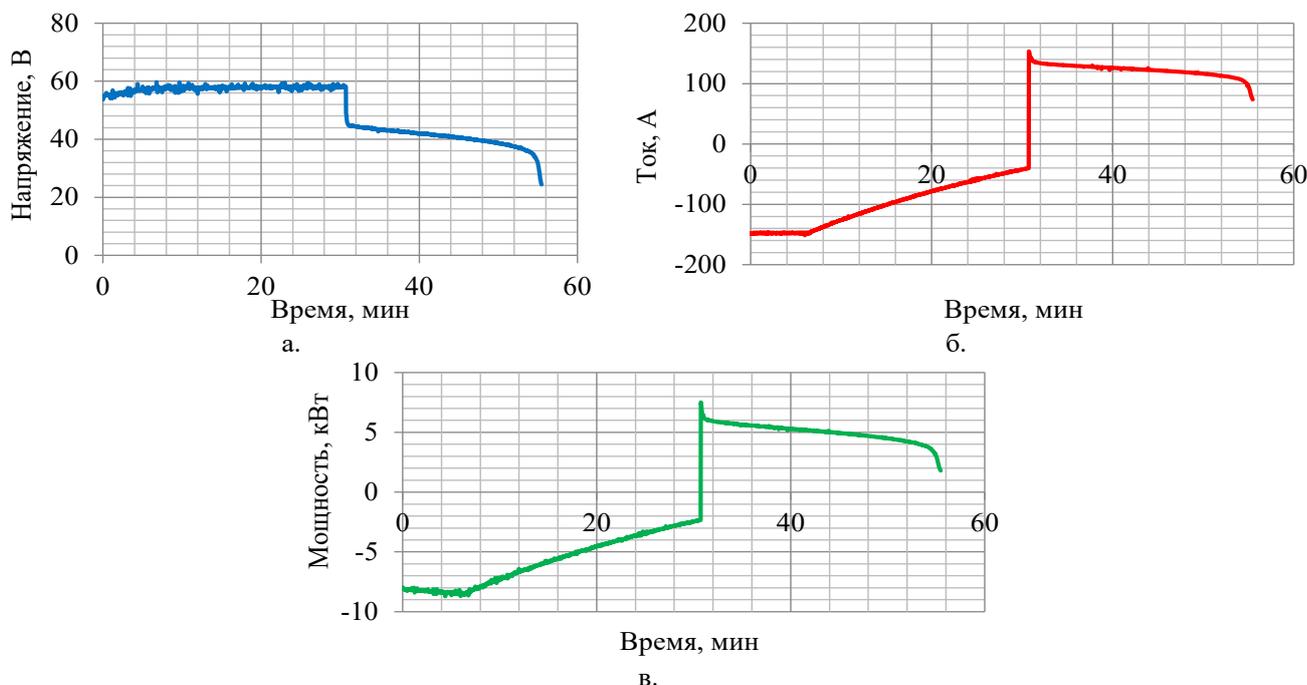


Рисунок 14 – Результаты испытаний ПАКБ при разряде на нагрузку с постоянным сопротивлением

По данным испытаний, полная энергия заряда составила 2,94 кВт·ч, а разряда – 2,05 кВт·ч. Таким образом, КПД по энергии равен 69,9 %. Средняя мощность, выделяемая на нагрузке (4,99 кВт), практически совпала с номинальной мощностью ячейки. Удельная емкость электролита составила 17,11 кВт·ч/м³, что находится на уровне лучших мировых результатов.

При заряде и разряде стека проточной аккумуляторной батареи происходит ее разогрев из-за выделения потерь мощности на внутреннем сопротивлении, которое, как указывалось выше, значительно. В то же время нагрев электролита свыше 45 °С недопустим из-за возможности его разложения. Поэтому во время испытаний постоянно контролировались температуры положительного и отрицательного электролитов, температура самого стека ПАКБ, а в программном обеспечении стенда была реализована защита по превышению температуры, которая при срабатывании отключала бы стек. Однако в ходе испытаний выяснилось, что температура электролита увеличилась всего на 5,7 градуса по сравнению с исходной (27 °С), что вполне допустимо.

Также были проведены испытания работы ПАКБ при заряде в том же режиме IU и последующем разряде на нагрузку с постоянной потребляемой мощностью. Для реализации последнего условия часть резистивных элементов РБ-315 включалась через блок управления нагрузкой на основе транзисторного ключа. В ходе разряда скважность управляющих импульсов ключа автоматически изменялась таким образом, чтобы мощность, выделяемая на нагрузке, была максимально близка к заданной (5 кВт). Графики тока, напряжения и мощности, полученные в ходе испытаний, показаны на рисунке 15 (поскольку заряд ПАКБ происходил аналогично, приведена только часть графиков, соответствующая режиму разряда).

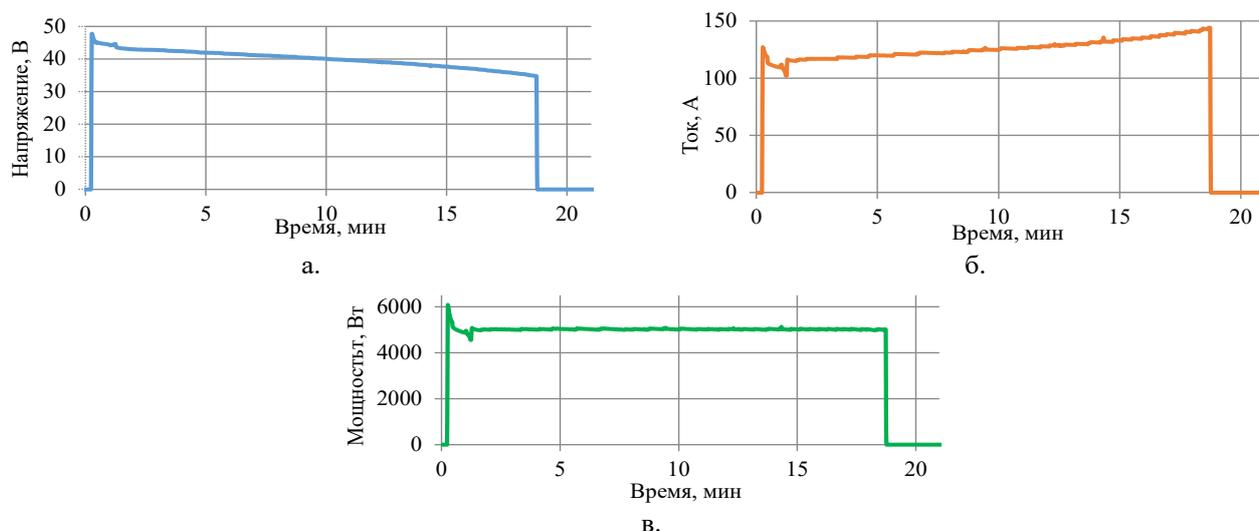


Рисунок 15 – Результаты испытаний ПАКБ при разряде на нагрузку с постоянной мощностью

Как видно из рисунка 15, в начале процесса разряда наблюдаются некоторые колебания мощности, вызванные значительной величиной постоянной времени в блоке управления нагрузкой (10 с), однако по истечении 1 минуты они практически прекращаются, и далее заданная мощность поддерживается с погрешностью, не превышающей 4 %. При этом ток монотонно увеличивается, достигая в конце процесса величины 145 А, а напряжение на нагрузке так же монотонно уменьшается. Процесс разряда принудительно завершается на уровне напряжения 35 В, поскольку далее выдаваемая мощность начинает резко снижаться. К тому же, достигнутая величина тока (145 А) была близка к максимальной допустимой величине тока для данного стека (150 А). Полное время разряда оказалось равным 18,5 минут и определялось сравнительно небольшим объемом электролита, который удалось наработать для проведения испытаний (120 л). Увеличение времени работы ПАКБ с постоянной мощностью может быть достигнуто увеличением объема используемого электролита.

Таким образом, испытания стенда проточной аккумуляторной батареи позволили сделать следующие выводы:

1) стек проточной батареи GEC-VFB-5kW обеспечивает длительную выдачу номинальной мощности 5 кВт в режиме разряда, при этом кратковременная выдаваемая мощность может достигать 8 кВт.

2) КПД ПАКБ по энергии составляет 69,9 %, а удельная емкость использованного электролита равна 17,11 кВт·ч/м³, что находится на уровне лучших мировых результатов.

3) блок управления нагрузкой позволяет реализовать режим разряда ПАКБ с постоянной мощностью.

4) увеличение температуры электролита в ходе испытаний не превышало 5,7 °С, таким образом, можно не опасаться недопустимого перегрева электролита.

Единственным недостатком, установленным в ходе испытаний, является значительное изменение напряжения на батарее в ходе разряда (от 58 В до 35 В). Следовательно, для обеспечения стабильного напряжения на нагрузке система питания на основе ПАКБ должна быть оснащена либо регулируемым DC-DC преобразователем (для питания нагрузки постоянного тока), либо регулируемым инвертором (для питания нагрузки переменного тока).

В заключении даны основные научные и практические результаты исследований в соответствии с поставленными задачами, решение которых обеспечило достижение цели диссертационной работы:

1. Отсутствие в РФ опыта разработки ПАКБ для систем бесперебойного питания нового поколения не позволяло определить возможности, сложности создания и эксплуатации таких накопителей электроэнергии. Проведен сравнительный анализ и определены достижимые показатели: плотность хранения энергии **30 – 70 Дж/г** (примерно **35 Вт·ч/кг**), КПД заряд/разряд **75 – 80%**, срок службы **10 – 20 лет**, количество циклов заряд/разряд **10000**, номинальное напряжение ячейки **1,15 – 1,55 В**.

2. Предложены и запатентованы элементы конструкции, исследовано влияние характеристик и компонентов накопителей электрической энергии на их эффективность и работу систем бесперебойного питания в целом. Полученные характеристики легли в основу гидросистемы и управляющей системы ПАКБ.

3. Моделирование и разработка схем преобразования параметров электрической энергии позволили интегрировать ПАКБ в системы бесперебойного питания для гибридных специализированных источников.

4. Математическое описание и алгоритмы управления ПАКБ в системе электроснабжения со специализированными источниками питания позволило

сконструировать испытательный стенд, на котором получены зарядно/разрядные характеристики. Эти характеристики позволяют проектировать реальные объекты накопителей электрической энергии с большим запасом энергии в несколько МВт и длительным периодом хранения (практически без потери энергетического заряда)

5. Экспериментальные исследования режимов работы ПАКБ выявили все факторы, влияющие на работу батарей в составе специализированных источников в системах бесперебойного электроснабжения.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК

1. Кузьмин И.Н., Источник питания для автономных систем электроснабжения на базе проточной аккумуляторной батареи / Воропай А.Н., Лоскутов А.Б., Осетров Е.С. // *Электричество*. 2022. № 10.С 45 – 52 (0,4 п.л./0,3 п.л.)
2. Loskutov, A.; Kurkin, A.; Kuzmin, I.; Lipuzhin, I. Ways to Ensure Parallel Operation of Vanadium Flow Batteries to Create High Power Energy Storage Systems. *Batteries* **2022**, 8, 120. <https://doi.org/10.3390/batteries8090120>
3. Kuzmin I, Source for autonomous power supply system based on flow battery / Loskutov A., Osetrov E., Kurkin A. // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 9. 3027 (0,4 п.л./0,3 п.л.). <https://doi.org/10.3390/en15093027>
4. Kuzmin I, Vanadium Redox Flow Battery Stacks Balancing to Increase Depth of Discharge Using Forced Flow Attenuation / Rashitov I., Voropay A., Tsepilov G., Loskutov A., Kurkin A., Osetrov E. and Lipuzhin I. // *Batteries* **2023**, 9, 464. <https://doi.org/10.3390/batteries9090464>
5. Кузьмин И.Н., Исследование влияния характеристик и конструкции накопителей электрической энергии на работу систем бесперебойного питания / Белов Д.В., Воропай А.Н., Лоскутов А.Б. // *Электричество*. 2020. № 10. С. 4-11. (0,4 п.л./0,3 п.л.)
6. Кузьмин И.Н., Влияния функционализации углеродного войлока в растворе кислот на ASR ванадий-кислотного проточного аккумулятора / Воропай А.Н., Иванов В.В. // В сборнике: Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2019. С. 242-244 (0,1 п.л./0,05 п.л.)

Патенты:

7. Патент РФ № 191123 U1. «Ячейка проточного аккумулятора». Правообладатель: ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ». Авторы: Воропай А.Н., Николаев А.В., Кузьмин И.Н., Иванов С.В., Иванов В.В., Капац В.В., Шелег А.О., Цепилов Г.В. Дата заявки:

09.04.2018. заявитель и правообладатель Закрытое акционерное общество "Межрегиональное производственное объединение технического комплектования "ТЕХНОКОМПЛЕКТ" (ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ») (RU).

Подписано в печать 29.03.2024. Формат 60 x 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 129.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.
Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.