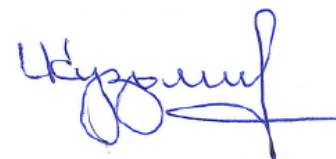


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. Алексеева

На правах рукописи



КУЗЬМИН ИВАН НИКОЛАЕВИЧ

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

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Лоскутов А.Б.

Нижний Новгород – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	9
1.1. Предпосылки использования проточных накопителей энергии большой мощности.....	9
1.2. Конструкция проточного аккумулятора.....	10
1.3. Сравнительные характеристики накопителей энергии.....	11
1.4. Структура модульных локальных источников энергии.....	13
1.5. Выводы по первой главе.....	15
2. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОГО АККУМУЛЯТОРА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	16
2.1. Исследование конструкции ячейки проточного аккумулятора.....	16
2.2. Оптимизация характеристик каналов ячеек проточного аккумулятора....	18
2.3. Исследование характеристик электролита.....	26
2.4. Моделирование емкости батареи проточных аккумуляторов.....	29
2.5. Приготовление электролита и экспериментальные исследования зарядных и разрядных характеристик.....	30
2.6. Математические модели зарядно-разрядных характеристик.....	32
2.7. Выводы по второй главе.....	39
3. РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	42
3.1. Разрядные характеристики проточных аккумуляторов.....	42
3.2. Способы обеспечения эффективной параллельной работ.....	43
3.2.1. Создание и настройка единой гидродинамической системы подачи электролита	43
3.2.2. Схема электрической части для объединения проточных аккумуляторов на параллельную работу.....	44
3.2.3. Моделирование работы группы параллельно соединенных стеков	46
3.3. Выводы по третьей главе.....	51
4. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СО СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ.....	52
4.1. Описание работы испытательного стенда.....	52
4.2. Управление нагрузкой проточной батареи.....	60
4.3. Управление гидросистемой электролита проточной аккумуляторной батареи	60
4.4. Реализация и алгоритмы системы управления на основе ПЛК200	62
4.5. Выходные характеристики проточного аккумулятора.....	69

4.6. Нагрузочные испытания проточной аккумуляторной батареи.....	74
4.7. Выводы по четвертой главе.....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	80
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	81
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
ДАТЧИКИ, КОНТРОЛЛЕРЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОТОЧНЫМ АККУМУЛЯТОРОМ	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
БАЛАНСИРОВКА СТЕКОВ ПРОТОЧНОЙ ВАНАДИЕВОЙ БАТАРЕИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ РАЗРЯДА	103
ПРИЛОЖЕНИЕ В	
ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ НА АНТИПЛАГИАТ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	143

ВВЕДЕНИЕ

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, аккумулялирование 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. рублей в год.

Максимальный объем российского сегмента рынка систем бесперебойного питания мощностью от 10 кВт к 2025 году может составить 120 млрд. рублей в год, что даст экономике России дополнительный эффект (за вычетом инвестиций) в 700 млрд. рублей 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. рублей в год, а для России в целом 1.0 – 1.5 млрд. рублей 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, R.A. 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 энергоёмкость на уровне лучших мировых производителей. [1], [2], [3]

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 заключается 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 мощностью 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 два патента.

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 «МППОТК»).

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 «МППОТК»).

Автор выражает благодарность сотруднику производственного объединения «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» (ЗАО «МППОТК») 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, 5 приложений. Содержание работы изложено на 183 страницах, включая 6 таблиц и 43 иллюстраций.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В 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 дорогостоящие электрооборудование. Даже внутри объекта могут быть потребители различных категорий, требующие разного подхода к системе энергообеспечения.

1.1. Предпосылки использования проточных накопителей энергии большой мощности.

Для обеспечения надежности 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 и бесперебойная система электроснабжения, при этом качество подаваемой электроэнергии не должно изменяться. Для этого в систему устанавливают источник бесперебойного питания (ИБП) или автоматический ввод резерва (АВР), которое позволяет в период отключения электроэнергии выполнить качественный переход на линию резервного питания. Для этого в состав ИБП вводят накопитель энергии: либо аккумуляторы [1,2,3]; либо суперконденсаторы [30, 76]; либо механические накопители энергии [40, 68]; либо др. [41]. Каждый накопитель энергии имеет свою нишу, а ввиду развития альтернативной энергетики становится актуальной задача использования ИБП для использования энергии, получаемой от солнца, ветра и др., т.к. данные источники энергии имеют не постоянный график генерации, сильно зависящий от природных условий. Поэтому уделяется большое внимание тому, а какие источники накопления энергии могут использоваться для энергетики и систем бесперебойного питания (СБП), а также для альтернативной энергетики. Одним из наиболее рациональных вариантов является проточный аккумулятор [12] который пригоден для длительного аккумулирования энергии и имеет хорошие стоимостные характеристики с перспективами снижения стоимости запасенного кВт*ч энергии [13].

1.2. Конструкция проточного аккумулятора.

Основным элементом проточного аккумулятора, в частности ванадий-кислотного (VRFB), является проточная ячейка (рисунок 1.1), где из-за необходимости прокачивания электролита через пористый углеродный электрод теряется часть мощности из-за гидросопротивления материалов. [33, 70] Одним из подходов к уменьшению гидродинамического сопротивления стало изменение конструкции биполярных пластин, которые по предлагаемой концепции 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 [33].

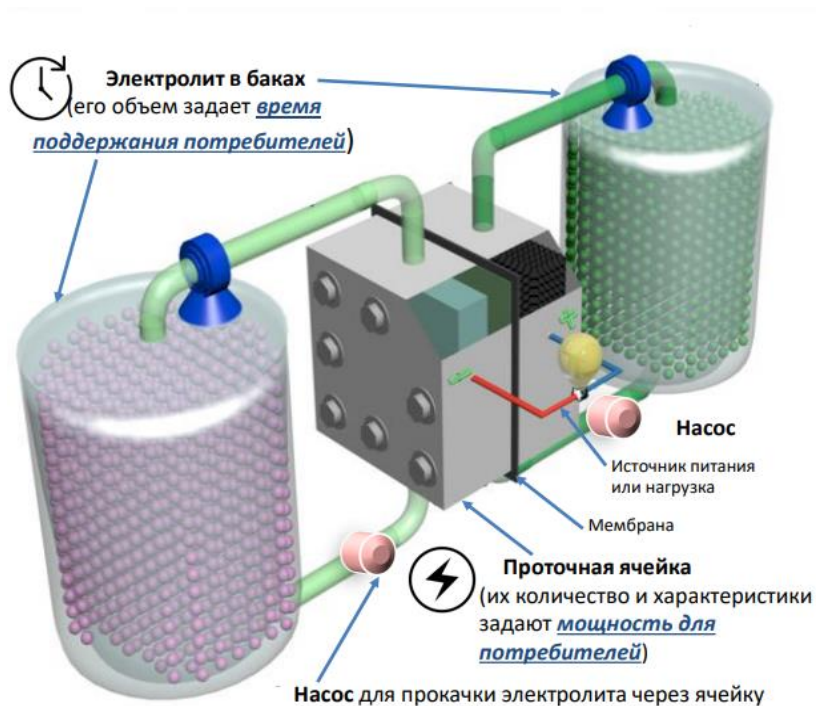


Рисунок 1.1 - Проточная ячейка

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, а также на эффективность системы в целом, когда проточная аккумуляторная батарея (ПАКБ) входит в состав СБП, как показано на схеме (рисунок 1.2).

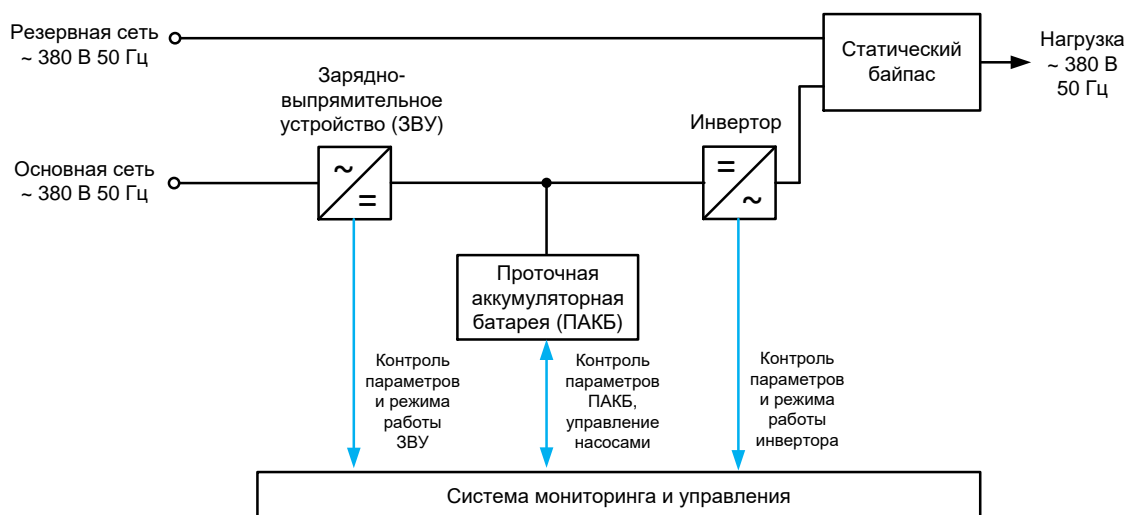


Рисунок 1.2 – Схема преобразования в СБП с ПАКБ

По результатам собственных стендовых исследований ПАКБ могут быть достигнуты следующие показатели эффективности.

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**.

1.3. Сравнительные характеристики накопителей энергии.

В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики известных накопителей электрической энергии. [26, 27, 36, 37, 38, 44, 46. 50, 51]

Таблица 1.1. 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 (H2)	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

Достоинством VRFB являются: долговечность; неограниченность батарей по мощности; допустимость 4-х кратной перегрузки; низкий уровень саморазряда, пожаробезопасность и низкая стоимость. [57,61, 72, 75]

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

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, способны на накопление больших объемов электроэнергии, могут применяться в закрытых помещениях. При этом мощность (зависящая от площади электродов), а 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 [39, 78]. Также сложная конструкция гидродинамической системы, требующая периодического обслуживания, будет снижать надежность 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 полного отсутствия электроэнергии от внешней электрической сети. В современных условиях локальные источники должны соответствовать широкому перечню требований: высокая эффективность, простота реализации, быстрый запуск, высокая маневренность компактность, отсутствие шума и т.д. [44, 46. 50, 51]

Наиболее перспективными источниками электроэнергии, которые могут работать в составе гибридной системы электроснабжения и удовлетворяют большинству требований по автономности, являются топливные элементы. Однако применение топливных элементов ограничивается рядом технических барьеров, связанных с хранением запаса топлива (водорода), особенностью внешних характеристик (мягкая вольт-амперная характеристика), необходимостью мониторинга и обслуживания. [38]

1.4. Структура модульных локальных источников энергии.

На основе анализа передовых разработок возможен подход к возможному сочетанию нескольких технологий для создания локальных источников, обеспечивающих надежное электроснабжение объектов критической инфраструктуры (рисунок. 1.3).

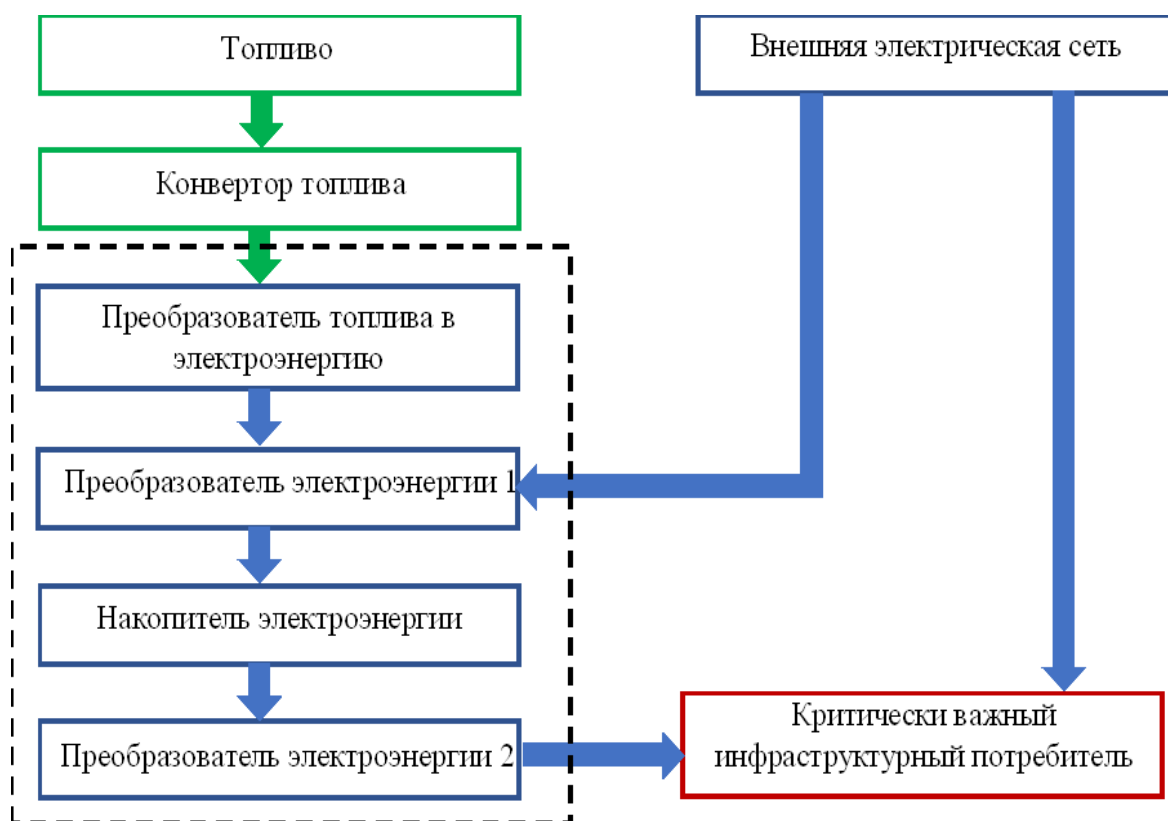


Рисунок 1.3. Структура локальных источников на основе преобразователей топлива.

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 целесообразно использовать 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. Эта функция накопителей больших энергий широко используется в странах с высокими тарифами на электроэнергию и с активным использованием ветроэнергетики и солнечных батарей. [14, 27, 31, 69,71]

1.5. Выводы по первой главе.

1. Выходные параметры электроэнергии модулей согласуются с параметрами потребителя на переменном токе. При отсутствии электроэнергии от внешней сети один из модулей будет выполнять функцию ведущего по напряжению.

2. Систему накопления целесообразно реализовать на основе проточных аккумуляторов. Каждый модуль должен иметь собственную систему управления (первого уровня) для управления зарядом накопителей, режимом работы топливного элемента.

3. Модули локального источника и 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 (в том числе, с учетом повышения срока службы элементов).

4. 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. Кроме того, накопленные объемы электроэнергии в ночные часы работы энергосистемы, когда тарифы минимальны, могут быть использованы в периоды максимальных нагрузок при дефиците мощности.

2. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОГО АККУМУЛЯТОРА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ.

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 проведено в программе COMSOL Multiphysics.

2.1. Исследование конструкции ячейки проточного аккумулятора.

Целью данного исследования является сравнение 2-х различных конструкций ячейки проточного аккумулятора. На рисунке 2.1 представлены модели полуячеек, в которой моделируется течение жидкости по каналу. Размер области расчета 150x120 мм глубина каналов варьировалась от 0.5-1.5 мм, ширина каналов варьировалась от 3 до 8 мм, количество каналов варьировалось от 3 до 19. Материал пластины графит с удельным сопротивлением 8 мкОм*м. Основные обозначения физических величин даны в таблице 1. Размер пористого углеродного материала в случае конструкции со змеевидным каналом 150x120x1 мм, пористость 92 %. Наиболее оптимальная конструкция 2 после сравнивалась с конструкцией 1.

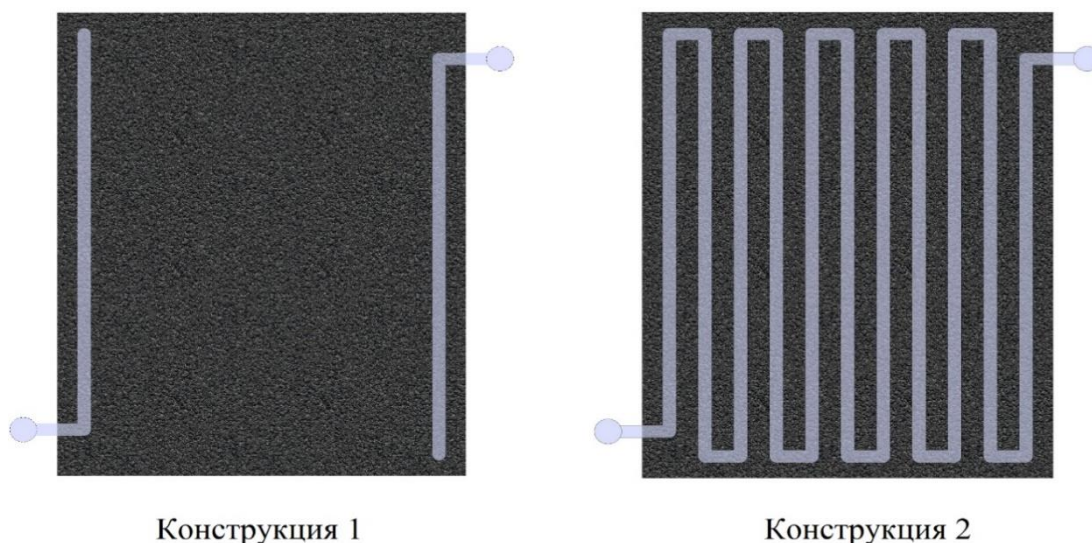


Рисунок 2.1 – Вид проточных полуячеек различной конструкции

Расчёт перепада давления и поля скоростей произведён путем численного решения системы уравнений в программе COMSOL. Течение электролита в проточном канале описывается уравнениями Навье – Стокса и уравнением неразрывности:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Течение в углеродном войлоке описывается моделью Бринкмана. Здесь записываются модифицированные уравнения Навье – Стокса для поля скоростей, усреднённых по объёмам, много меньшим размеров конструкции, но много большим размеров пор (согласно сравнительному анализу, изложенному в [9, 32, 39] данная модель является наиболее подходящей для конструкций 1 и 2):

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p - \frac{\mu}{\kappa} \mathbf{u} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Обозначения физических величин

Таблица 2.1

Обозначение	Наименование
ρ	Плотность электролита
μ	Вязкость электролита
ε_p	Пористость углеродного войлока
κ	Проницаемость углеродного войлока
\mathbf{u}	Скорость течения электролита
p	Давление электролита
$\Delta p_1, \Delta p_2$	Перепад давления электролита на входе и выходе из полужайчки
Q_1	Объёмный расход электролита через полужайчку
Q_2	Объёмный расход электролита через углеродный войлок в конструкции 2
$\Delta P_1, \Delta P_2$	Мощность гидравлических потерь для ячеек конструкций 1 и 2 соответственно
P_1, P_2	Мощность ячеек конструкций 1 и 2 соответственно

Параметры электролита приняты следующие: плотность электролита $\rho=1,355$ г/см³, динамическая вязкость $\eta=2,5$ мПа·с. При различных комбинациях параметров число Рейнольдса изменялось от 15 до 43. Для расчёта была выбрана модель ламинарного течения.

2.2. Оптимизация каналов ячеек проточного аккумулятора.

В работе проведено моделирование влияния величины высоты и ширины канала при радиусах кривизны при повороте канала $r = 0$ и $R = d/2$ (данные значения выбраны из соображений более простого технологического исполнения). По перепаду давления вычислены значения мощности потерь при различных геометрических параметрах канала полуячейки при объёмном расходе электролита $Q = 0,5$ л/ч. Количество участков канала $N = 9$. Также стоит учесть, что при увеличении размера канала увеличивается электрическое сопротивление токосъёмной пластины. Мощность потерь на электрическое сопротивление оценено по формуле:

$$P=0,02592 \cdot h/S \quad (2.3)$$

Где h – это глубина канала; S – это площадь контакта.

Проведенные расчеты по оптимизации количества каналов показали, что при увеличении количества каналов увеличивается гидродинамическое сопротивление и электрическое сопротивление, поэтому необходимо ввести дополнительный параметр оптимизации, по которому следует ограничить количество каналов. Данным параметром должно выступать значение количества электролита протекающего в порах углеродного материала, который в данной конструкции располагается над каналами, ведь чем меньше каналов, тем больше между ними расстояние и тем меньше электролита проникает в пористый углеродный материал, что снижает мощность системы, но т.к. моделирование пористого тела не входит в данную работу, мы ограничим количество каналов по площади каналов согласно работе [9], где площадь каналов не менее 30 %. Следовательно, при площади 180 см² площадь каналов должна быть не менее 54 см², а площадь контакта должна быть не более 126 см². Таким образом конструкция с 11 каналами наиболее оптимальна.

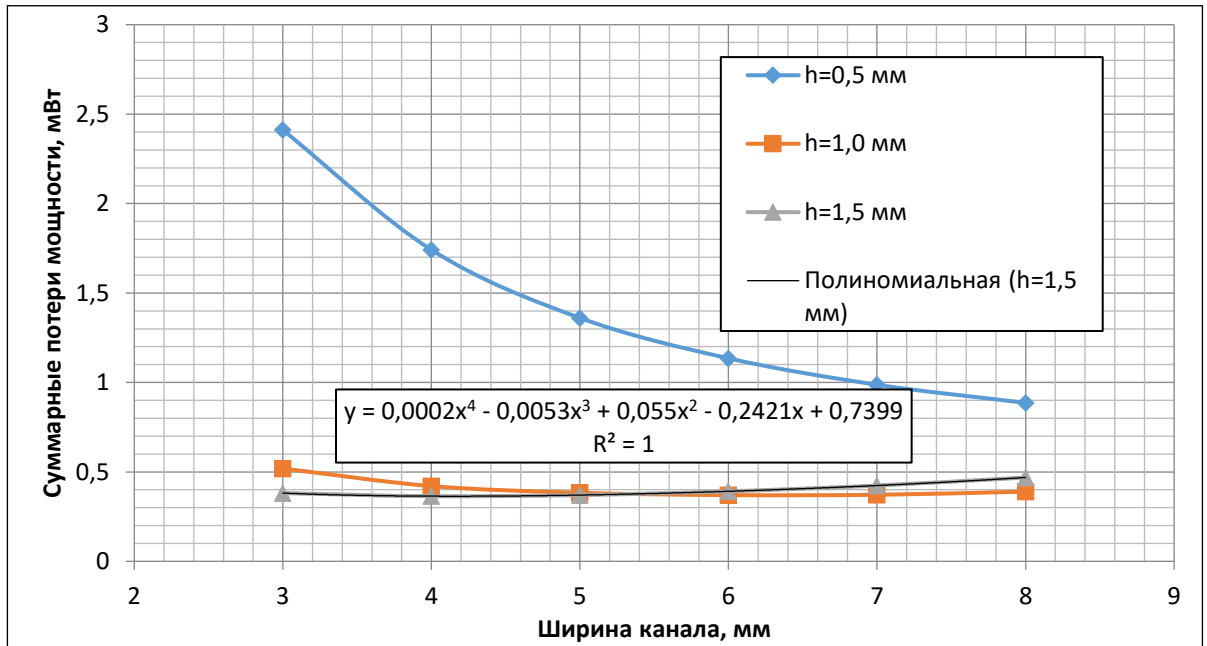


Рисунок 2. 2. – Кривые зависимости суммарной мощности потерь от ширины и глубины канала.

На рисунках 2.2.,2.3 представлены графики зависимостей суммарной мощности (гидродинамической и электрической) потерь в зависимости от глубины канала для геометрии с 11 каналами и шириной канала 4 мм. Аппроксимируя данные полиномом 4 степени (подобран т.к. дает R=1) находим значение минимума функции $h \approx 1.4$ мм, (округляем до 1 знака после запятой, т.к. технологически в производстве мы ограничены точностью изготовления деталей из графита до ± 10 мкм [18]).

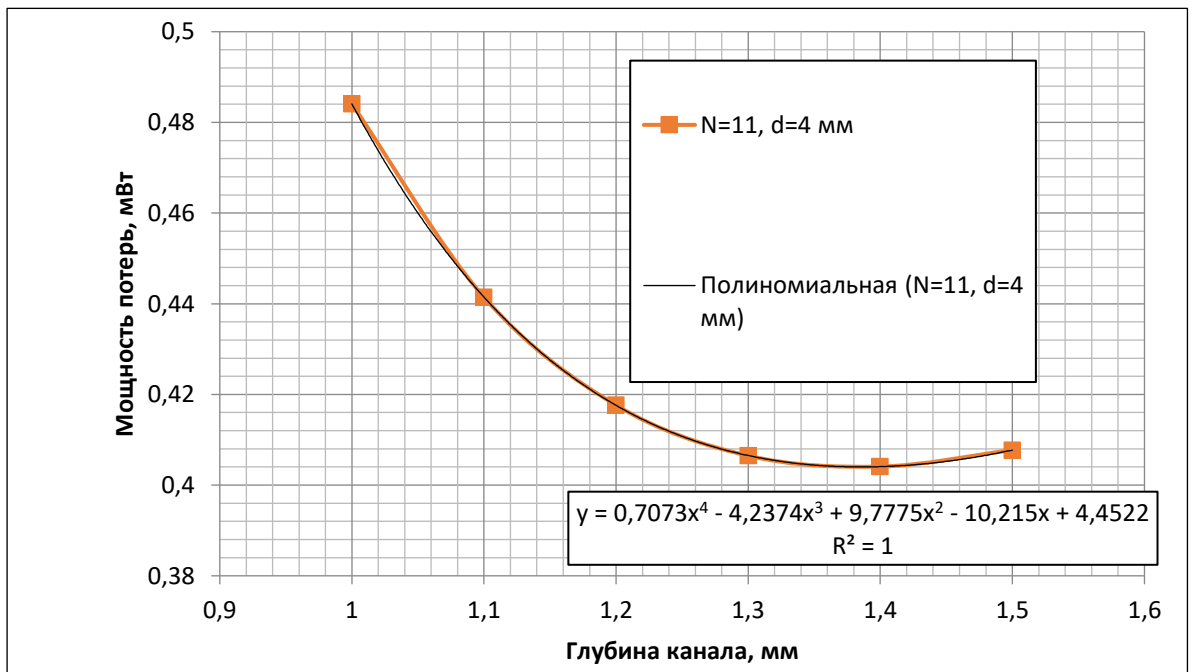


Рисунок 2.3 – Кривая зависимости суммарной мощности потерь мощности в зависимости от глубины канала. Количество каналов 11, ширина канала 4 мм.

Таким образом наиболее оптимальной конструкцией ячейки со змеевидным каналом является конструкция следующих параметров: глубина каналов 1.4 мм, ширина каналов 4.2 мм, количество каналов 11.

На рисунке 2.4 представлены модели перепада давления в полуячейках при скорости течения электролита 0.1 л/ч.

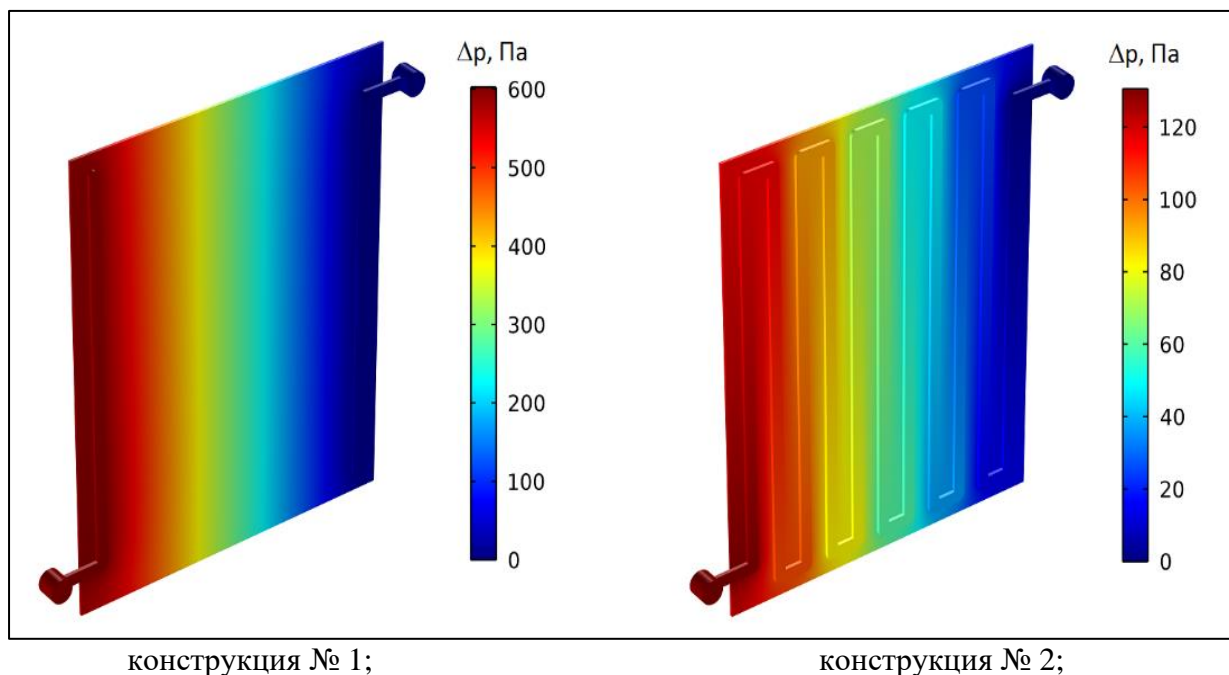


Рисунок 2.4 – Перепад давления в полуячейках при скорости течения жидкости 0.1 л/ч.

Видно, что в конструкции №1 перепад давления почти в 5 раз выше, чем в конструкции №2, что согласуется с данными работы [39], где рассмотрена 2D-модель движения электролита в сегменте проточного канала конструкции ячейки, аналогичной конструкции №2, исследованы влияние входного объемного расхода, проницаемости пористого слоя, толщины пористого слоя и толщины проточного канала на проникновение потока в пористый слой, рассчитана плотность тока в такой ячейке. Оценка удельного тока в пористом углеродном материале, в случае конструкции №2 проводилась аналогично работе [40].

Расчет зависимости перепада давления от скорости течения электролита представлен на рисунке 2.5.

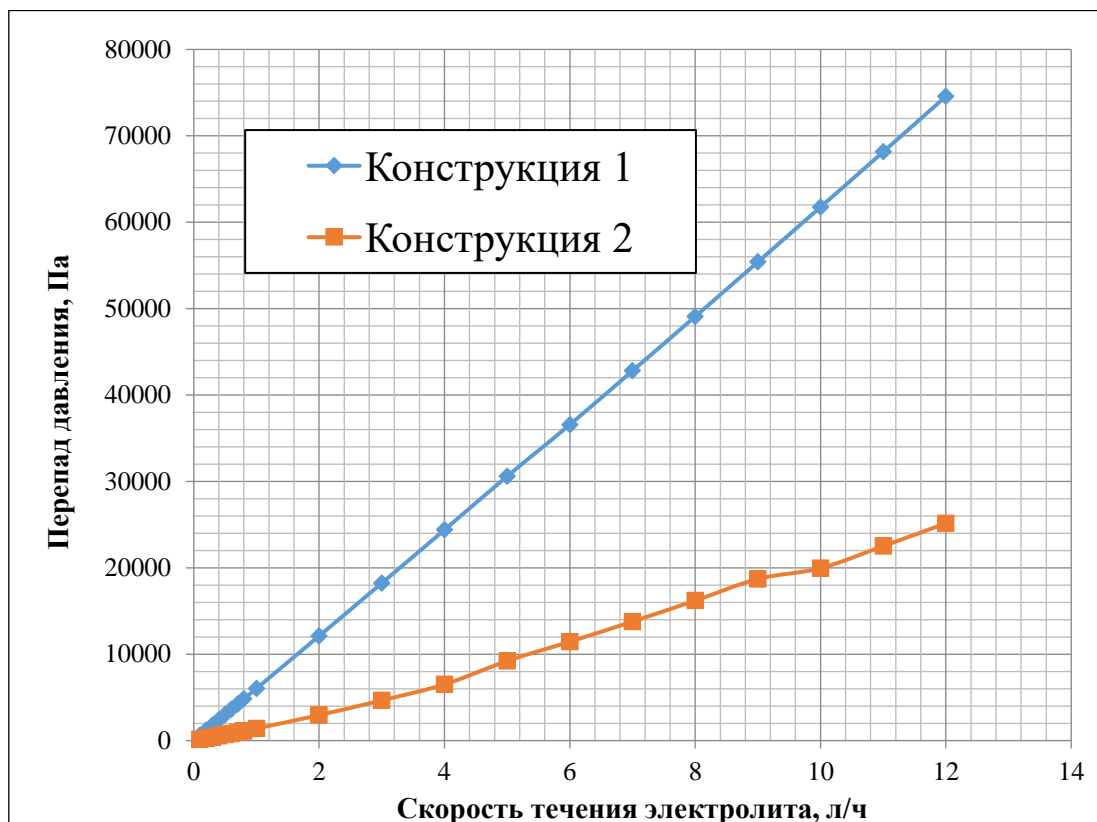


Рисунок 2.5 – Кривые зависимости перепада давления в полуячейках при различной скорости течения электролита.

Для данной области скоростей наблюдается линейный характер зависимости перепада давления от скорости течения электролита, что видимо, связано с отсутствием сильной турбулентности в потоке электролита.

Для того, чтобы оценить мощность в полуячейке со змеевидным каналом необходимо определить объем электролита, проходящий в единицу времени через объем пористого углеродного материала, т.е. определить объемную скорость электролита в пористом электроде.

Данная скорость равна полной интегральной скорости проникновения электролита в пористый материал и определяется выражением:

$$Q_2 = \frac{1}{2} \iint |u_y| dS$$

Интегрирование ведётся по плоскости, разделяющей пористый электрод и канал по которому протекает электролит (Рисунок 2.6 а). Кривая зависимости скорости течения электролита в электроде в зависимости от скорости течения электролита в змеевидном канале представлена на рисунке 2.6 б.

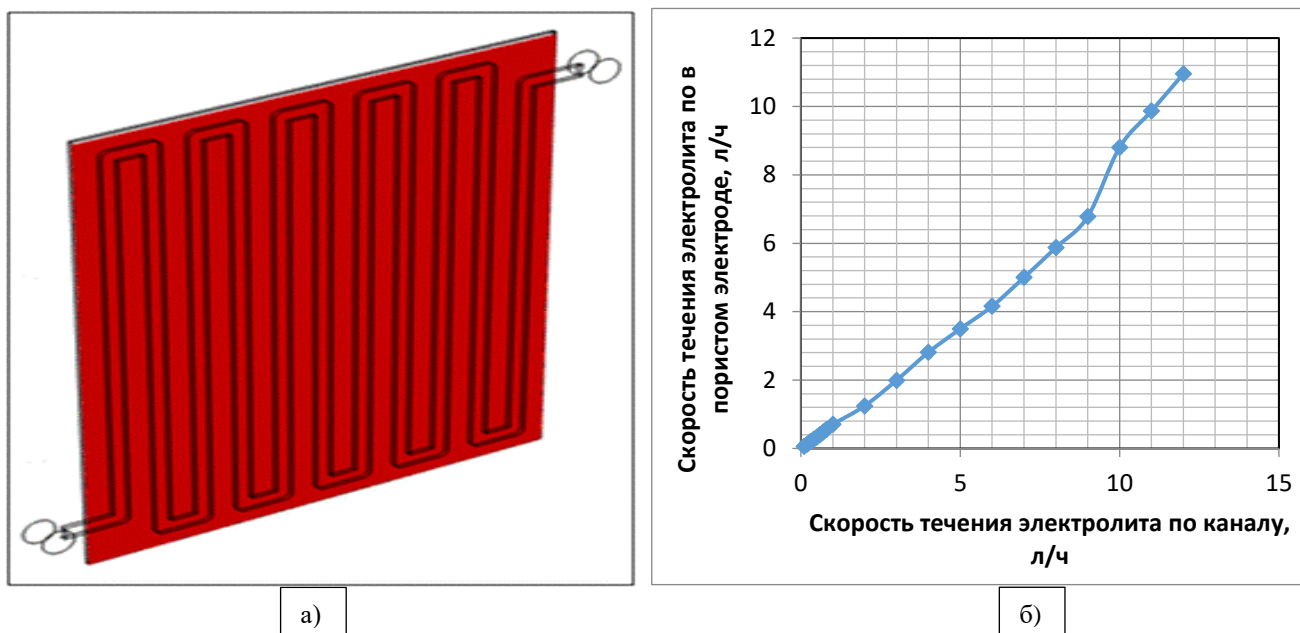


Рисунок 2.6 – а) 3D-модель демонстрирующая расположение плоскости, по которой ведётся интегрирование поля скоростей; б) зависимость скорости течения электролита в электроде в зависимости от скорости течения электролита в змеевидном канале

Зависимость мощности ячейки и концентрации ионов от расхода электролита была вычислена итерационным методом. В качестве начальных значений были выбраны: удельный ток 80 мА, напряжение 1.25 В, что при заданной геометрии электрода дает мощность ячейки 18 Вт. Начальная концентрация электролита 1,5 моль/л, таким образом:

$$P_0 = 18 \text{ Вт}, \quad C_0 = 1,5 \text{ моль/л}$$

Временной шаг $\Delta t = 1 \text{ с}$.

Первый шаг итерации учитывает убыль концентрации за счёт химической реакции:

$$C_{i+1} = C_i - \frac{P_i \Delta t}{k}$$

Здесь $k = VeN_A U$; $V = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ – объём, в котором происходит реакция, $U = 1,25 \text{ В}$ – потенциал ячейки проточного аккумулятора.

Следующий шаг учитывает обновление электролита за счёт циркуляции за время Δt :

$$C'_{i+1} = \frac{C_0 Q \Delta t + C_{i+1} (V - Q \Delta t)}{V}$$

Необходимо, чтобы шаг времени удовлетворял условию:

$$\Delta t < \frac{V}{Q}$$

Третий шаг строится из предположения, что мощность пропорциональна концентрации

$$P_{i+1} = P_i \frac{C'_{i+1}}{C_i}$$

Далее цикл замыкается: $P_i = P_{i+1}; C_i = C'_{i+1}$.

Расчёт показал, что не при любом расходе электролита устанавливается максимальная мощность. Скорость обновления ионов может не обеспечивать эту мощность. Однако, чем больше расход электролита, тем выше гидросопротивление, что также уменьшает КПД. Мощность гидравлических потерь связана с расходом электролита и перепадом давления в ячейке:

$$\Delta P = 2Q\Delta p$$

На рисунке 2.7 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).

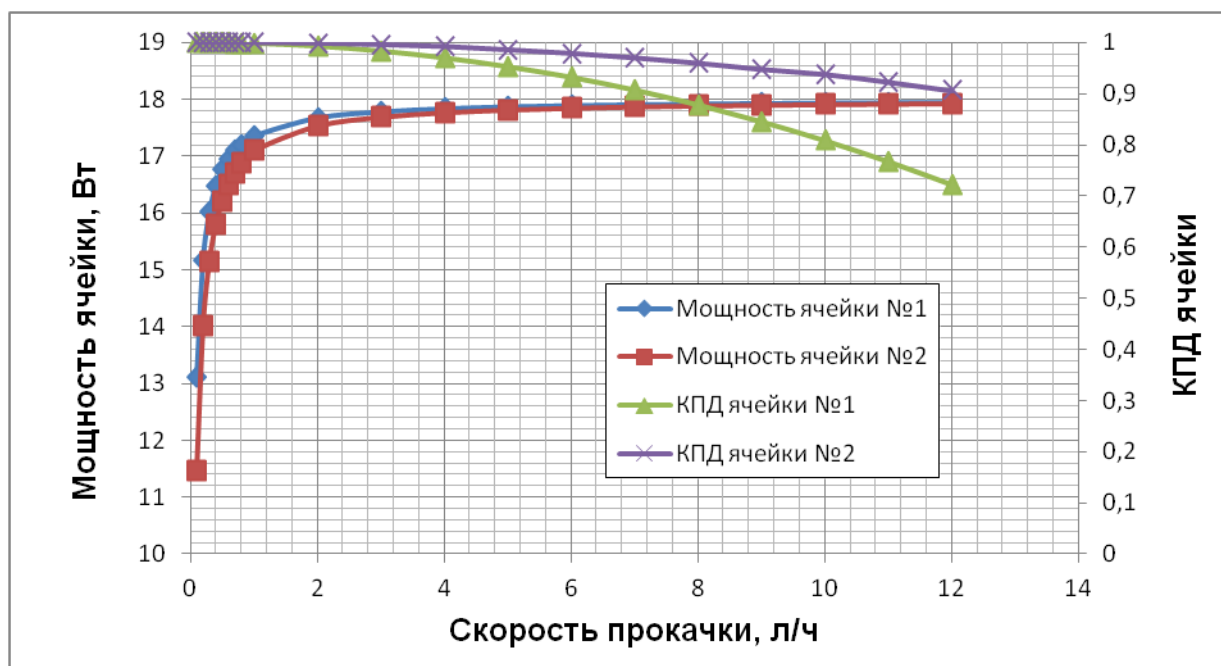


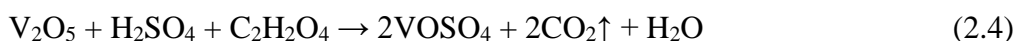
Рисунок 2.7 – Кривые зависимости мощностей ячеек и их КПД от скорости течения электролита через ячейку

Видно, что мощность в зависимости от скорости течения электролита для конструкции №1 изменяется практически также, как и для конструкции №2, но 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

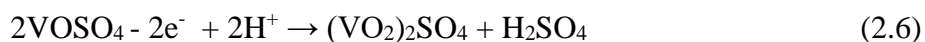
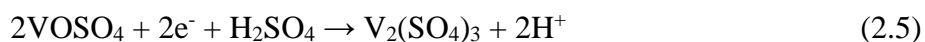
ячейкой со змеевидным каналом. Таким образом, конструкция ячейки проточного аккумулятора со змеевидным каналом является более приемлемой с точки зрения снижения потерь на гидродинамическое сопротивление.

2.3. Исследование характеристик 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 1,6 М раствор сульфата ванадила (VO_2SO_4) в 1,5 М растворе серной кислоты. Восстановление протекает согласно формуле (2.4).



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 (2.5), а окисление – формуле (2.6).



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.

При изготовлении электролита в реакторе (при восстановлении его щавелевой кислотой) образуется углекислый газ, который может уносить с собой капли электролита и пары кислот. Для этого в системе откачки воздуха из реактора стоит система очистки газа, которая представляет из себя колонну с раствором соды. Сода реагирует с парами кислоты и нейтрализуется. Капли электролита же улавливаются раствором и растворяются в нем. Данный раствор периодически меняют, нейтрализуя ванадий перекисью водорода или тетрагидроборатом натрия.

Восстановление пентаоксида ванадия щавелевой кислотой в растворе серной кислоты.

На 5 литров электролита (единичная загрузка реактора максимально 5 литров, (рисунок 2.8) использовано: 740 г V_2O_5 (чистота 98,3 %), 500 г $C_2H_2O_4$ (чистота 99,8 %), серная

кислота 1200 мл (чистота 99,92 %) и дистиллированная вода до объема 5 литров. Восстановление проводилось при постоянном перемешивании и температуре 50-60 °С в течение 24 часов. После электролит сливался в емкости для хранения и настаивался в течение 5 суток до прекращения газовыделения.



Рисунок 2.8 – Фото реактора для изготовления электролита

После восстановления (определялось по отсутствию мутности раствора и отсутствию желтого осадка) пентаоксида ванадия получался электролит, содержащий 6 масс% ванадия и плотностью 1,339-1,351 г/см³.

Данный электролит исследовался на спектрофотометре СФ-2000 в диапазоне длин волн 190-1100 нм (рисунок 2.9) для подтверждения наличия в нем ионов ванадия VO²⁺.

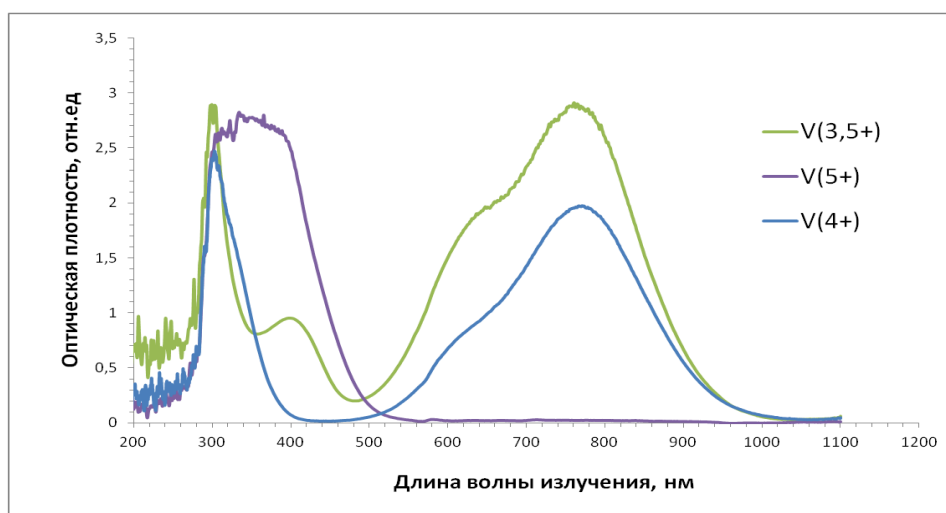


Рисунок 2.9 – Спектры проб электролита для различных степеней окисления ванадия

После этого электролит заливался в бак для положительного и отрицательного электролита ячейки (рисунок 2.10) и заряжался при напряжении 2,4 В до достижения тока менее 0,2 А и

изменения окраски положительного электролита до желтого цвета. Таким образом, в одном контуре ячейки получен электролит с ионами ванадия VO_2^+ (положительный электролит), а в другом контуре ячейки с ионами ванадия V^{3+} (отрицательный электролит).



Рисунок 2.10 Ячейка в сборе с гидросистемой

После полной зарядки электролита отрицательный электролит, который содержит только ионы ванадия V^{3+} , смешивался в пропорции 1:1 с исходным электролитом, полученным на этапе 1. Таким образом, получен электролит со средним зарядом $[3,5+]$ (спектр представлен на рисунке 2.9), концентрацией ванадия 6 масс%, концентрацией кислоты 28-30 масс% и плотностью 1,339-1,351 г/см³, что по составу соответствует электролиту «Vanadium Electrolyte Solution 1.6 M» производимому компанией GfE Gesellschaft für Elektrometallurgie mbH (Германия) и на 10 % по энергоёмкости превосходит электролит «GEC-VES-1.5M Vanadium Electrolyte Solution» производимый компанией Golden Energy Century Ltd (Китай).

Положительный электролит (содержащий ионы ванадия VO_2^+), полученный на этапе зарядки электролита (этап №2), вновь восстанавливался с использованием щавелевой кислоты до приобретения ионами ванадия степени окисления $[4+]$. Масса навески кислоты составляла 500 г на 5 литров раствора положительного электролита. В результате этого шага получен электролит аналогичный исходному, который может быть использован далее для получения электролита со средним зарядом $[3,5+]$ по данной схеме начиная со 2-го шага.

2.4. Моделирование емкости батареи проточных аккумуляторов.

В реальных условиях емкость батареи отличается от теоретической емкости, что связано с падением напряжения на внутреннем сопротивлении, кроссовером электролита через мембрану и затратами на работу насосов [9]. Чтобы оценить емкость недостаточно только знать объемы электролитов в баках, но и важно определить текущую валентность ионов ванадия [8-9]. В работе [9] отмечается, например, использование метода потенциометрического титрования для определения концентрации ионов ванадия, но данный метод не подходит для определения ионов в процессе работы батареи из-за своей трудоемкости и длительности проведения анализа. Ввиду этого изменение концентрации ионов ванадия в различных контурах электролита (положительный и отрицательный электролиты) оценивают путем измерения изменения потенциала полужайки по уравнению Нернста или по свойствам электролита, таким как проводимость, вязкость и плотность электролита.

В работе [32] напротив используется подход, основанный на моделировании системы исходя из ее технических параметров и текущей нагрузки, что помогает предсказать моменты, в которые необходимо проводить техническое обслуживание системы. Однако данный подход имеет недостатки, а именно он не учитывает деградацию системы со временем.

Проточные ванадиевые батареи только появляются в России и необходимо развитие компетенции в данной области науки и техники. С момента появления проточных ванадиевых батарей остро стоит вопрос о оценке остаточной емкости батареи, т.к. при кроссовере электролита и частичное окислении ионов ванадия происходит разбалансировка батареи. Для того, чтобы оценить емкость батареи используют разные методы, но наиболее перспективным может оказаться метод построенный на анализе текущего состояния напряжения и тока при различных условиях нагрузки [2]. В данной работе мы анализируем работу батареи при различной мощности разряда для системы 10 кВт. Поэтому в своей работе мы хотим разработать подход, который поможет в будущем получать данные состояния батареи и ее остаточном ресурсе на основе текущих показателей, как это работает для свинцовых батарей или суперконденсаторов на основе уравнения Пейкерта [49]

2.5. Приготовление электролита и экспериментальные исследования зарядных и разрядных характеристик.

В работе проводились испытания на проточной батарее производства Technokomplekt (Russia) со стеками по 5 кВт.



Рисунок 2.11. - Фото ванадиевой проточной батареи

Данные спектрофотометрии представлены на рисунке 2.12.

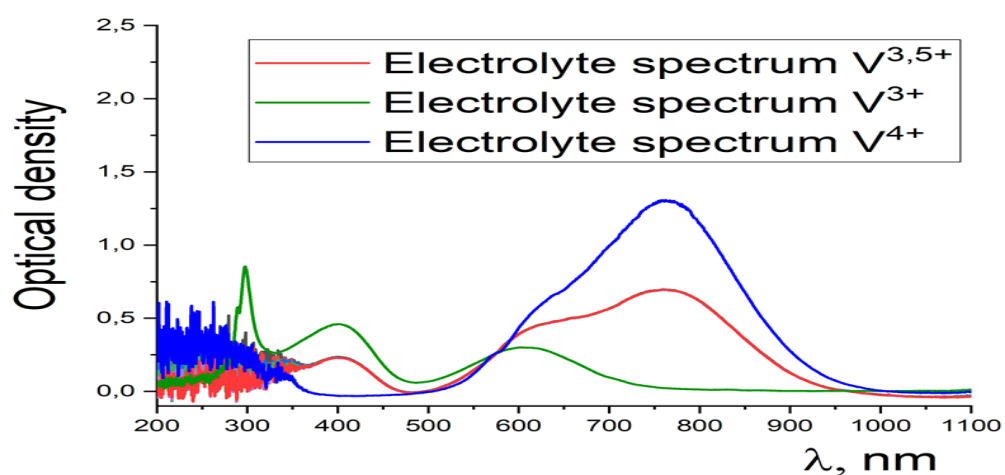


Рисунок 2.12 – Спектры оптической плотности для ванадиевого электролита перед зарядом.

Они демонстрируют, что исходный электролит имеет соотношение ионов ванадия очень близкое к 50:50 для ионов V^{3+} и VO^{2+} . Каждый раз перед новым зарядом системы электролит в баках перемешивался для возврата к состоянию $V^{3.5+}$, чтобы исключить влияние разбалансировки на полученные результаты. Спектрофотометрические исследования проводились на приборе SF-2000 в интервале длин волн от 190 до 11000 нм с шагом 0,1 нм. В качестве стандарта для проведения испытаний выступал 3 Молярный раствор серной кислоты. Аликвоты исходного электролита отбирались из баков с использованием стеклянной пипетки и разбавлялись 3 М раствором серной кислотой в соотношении 1:20 для электролита и раствора серной кислоты соответственно. Измерения проводились в кюветах 10x10 мм. Определение концентрации ионов VO^{2+} проводилось сравнением интенсивности линии на 760 нм, а и определение концентрации ионов V^{3+} проводилось сравнением интенсивности линий на 400 нм. Таким образом установлено, что электролит имеет состав 0,8 моль/л VO^{2+} и 0,8 моль/л V^{3+} , как это продемонстрировано в работе [2]. На рисунке приведены линии для ионов VO^{2+} и V^{3+} , которые получены от калибровочных растворов с концентрацией ионов ванадия 1,6 моль/л. Концентрация ионов ванадия рассчитывалась относительно линий калибровочных растворов по формуле (1).

$$C_V = 1.6 * \frac{I_2}{I_1} \quad (2.7)$$

где C_V - это концентрация ионов ванадия определенного вида (моль/л); I_1 и I_2 - интенсивность сигнала на соответствующей длине волны для калибровочного и рабочего электролитов соответственно.

После проводился для всех экспериментов заряд методом IU, сначала заряд постоянным током 100 А до напряжения 116 В, а затем дозаряд при напряжении 116 В до достижения тока 5 А. Разряд проводился фиксированной мощностью в диапазоне от 6 до 12 кВт до напряжения 65 В. Измерения проводились с использованием разработанной в компании Technokomplekt (Russia) системы бесперебойного питания, схема которой приведена на рисунке 3 и описана в работе [18]. Только в нашей работе использовалась батарея на 10 кВт, состоящая из двух стеков по 5 кВт. Погрешность измерения напряжения составляет 0,1 В, а погрешность измерения тока 0,05 А.

Расчет емкости системы проводился

$$E = \int_0^t U(t)I(t)dt \quad (2.8)$$

где время определяется от момента начала разряда (когда ток разряда становится больше 50 А), до момента окончания разряда (когда напряжение становится менее 65 В). Примерное время выхода на рабочий режим разряда 2 секунды.

2.6 Математические модели зарядно-разрядных характеристик.

На рисунке 2.13 представлены разрядные кривые при различной мощности разряда.

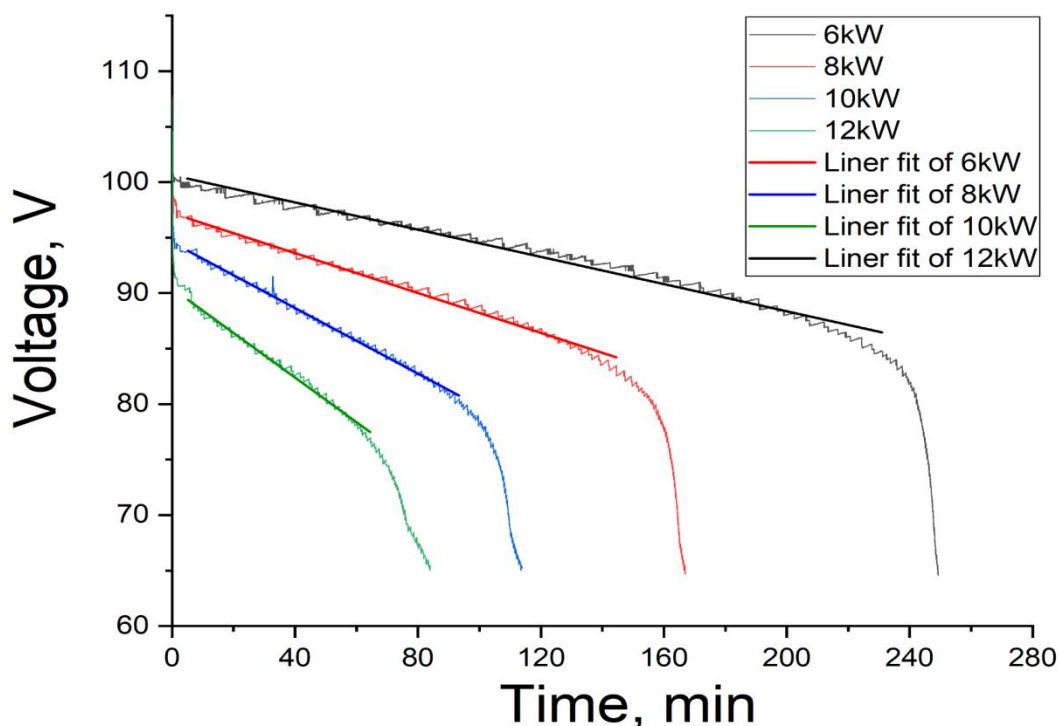


Рисунок 2.13. - Разрядные кривые батареи при мощности разряда 6, 8, 10 и 12 кВт.

Видно, что время разряда при повышении мощности снижается и также увеличивается наклон кривых разряда. Увеличение наклона связано с более быстрым ростом внутреннего сопротивления при повышении мощности. Этот эффект возникает ввиду того, что повышение тока приводит к большему сопротивлению со стороны электрохимической системы т.к. возрастают диффузионные ограничения связанные с транспортом ионов к поверхности электрода [9]. Также можно наблюдать, что напряжение после определенного значения резко убывает, причем это значение тем ниже, чем больше мощность разряда.

Проведя линейную аппроксимацию кривых разряда определены коэффициенты наклона линейных участков (рисунок 2.14). Данные значения аппроксимированы с использованием Box Lucas model, т.к. данная модель удовлетворяет условию обращения в нуль при нулевой мощности разряда (при нулевой мощности разряда график разряда должен в идеале представлять прямую линию параллельную оси абсцисс), а также эта зависимость демонстрирует хороший коэффициент Reduced Chi-Sqr около 0,9. Стоит уточнить, что в реальных батареях при нулевой мощности разряда напряжение все же будет уменьшаться ввиду эффекта саморазряда, который в проточных батареях

обусловлен 2 факторами: это шунтирующие токи и кроссовер ионов ванадия через мембрану [33]. Также стоит отметить, что на сегодняшний день используются сложные физико-математические модели проточной батареи, которые моделируют комплексно ее работу. Такие модели имеют хороший предсказательный характер, но требуют значительных вычислительных мощностей [40]. Здесь же мы используем простую аппроксимацию кривых разряда для грубого предсказания параметров системы.

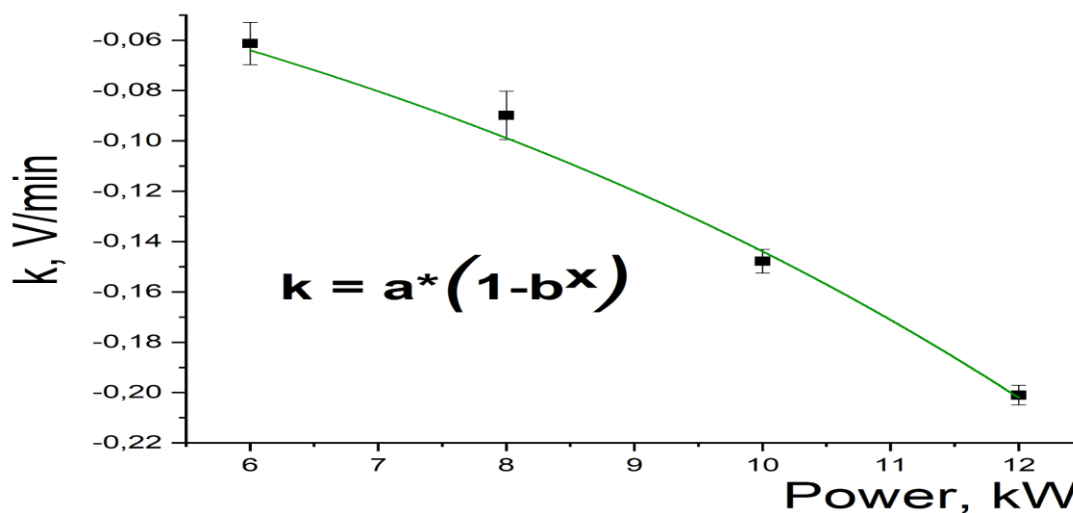


Рисунок 2.14. - Зависимость коэффициента наклона линейного участка кривой разряда от мощности разряда

Как видно из рисунка 2.14 кривая Vox Lucas model хорошо описывает экспериментальные данные. Определенные из модели коэффициенты соответственно равны: $a=0.05529$, $b=1.13672$.

На рисунке 2.15 представлены кривые максимального (стартового) и среднего напряжения разряда.

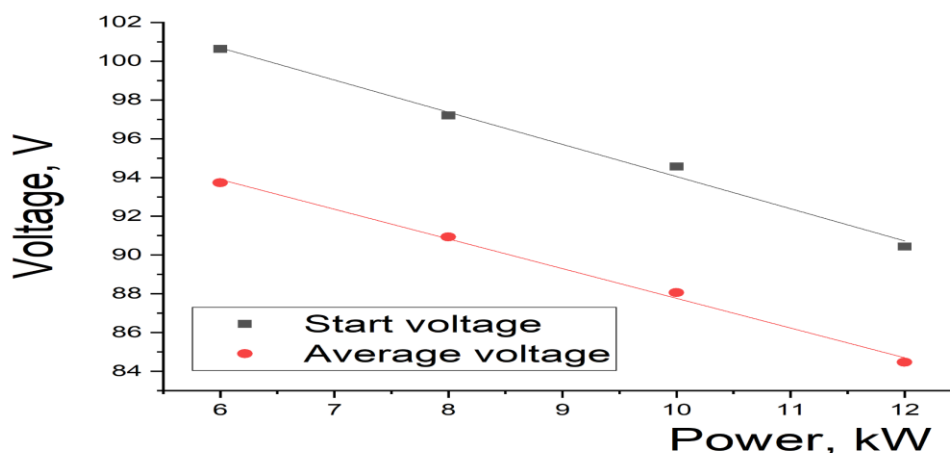


Рисунок 2.15. - Зависимость стартового и среднего напряжения разряда от мощности разряда

Среднее напряжение определяется как напряжение на середине интервала линейной аппроксимации. Значение среднего напряжения необходимо для модели предсказания времени работы батареи при различных мощностях разряда. Ведь зная 2 точки по напряжению и коэффициент наклона кривой можно определить время работы батареи. При этом стоит отметить, что линейная аппроксимация не затрагивает начальный участок в 5 минут и конечный участок, который разный для разных мощностей разряда. Это так называемый участок диффузных ограничений [2], когда транспорт ионов к поверхности электрода затруднен в силу того, что концентрация их в электролите снижается. Поэтому мы оцениваем время работы по линейному участку с учетом доли энергии, после изгиба кривой разряда (рисунок 2.16 а-с).

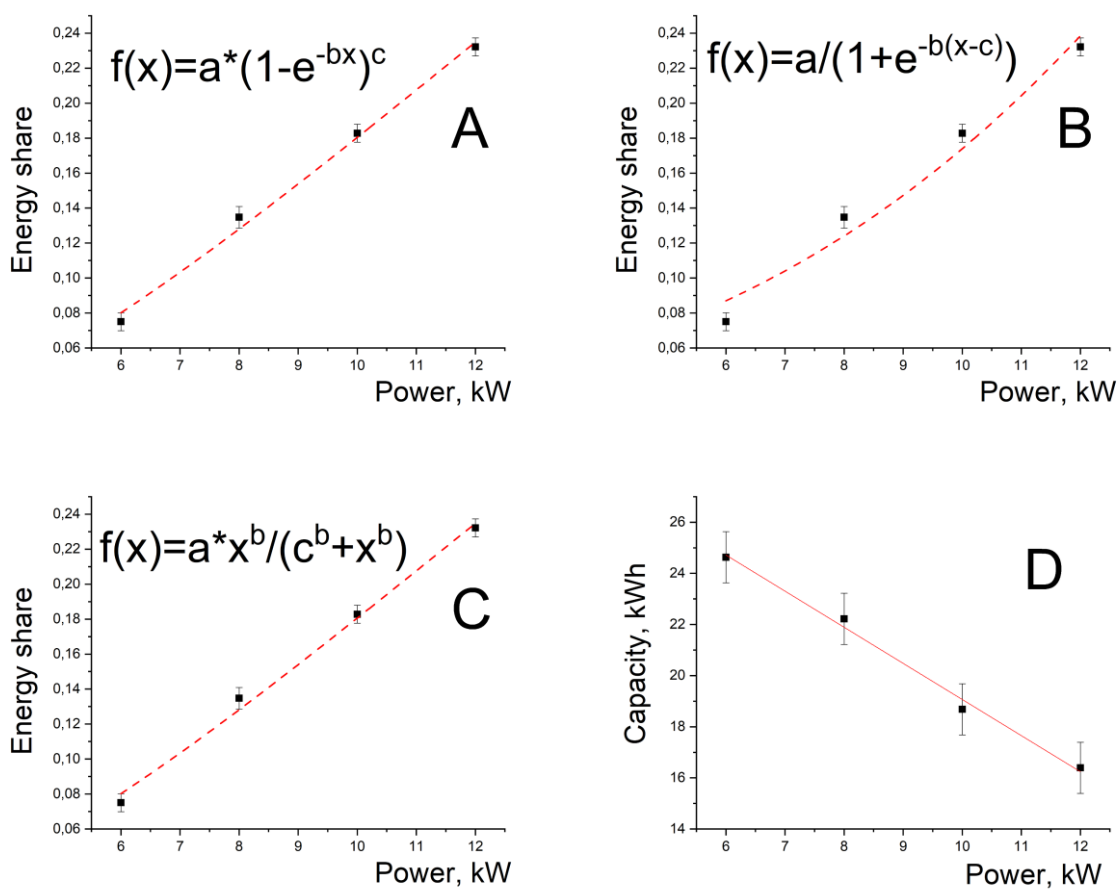


Рисунок 2.16. - Зависимость доли энергии после изгиба от мощности разряда при аппроксимации: а) Charpmан; б) Slogistic1; в) Hill; д) зависимость емкости батареи при разряде от мощности разряда

На рисунке 2.16 а-с сложно оценить, по какому именно закону изменяется доля энергии после изгиба от мощности разряда. Также тут велика роль субъективной ее оценки при попытках определить точку перегиба. Линейная аппроксимация не удовлетворяет условию нуля, т.к. при мощности стремящейся к нулю в идеальной системе доля энергии после изгиба должна стремиться к нулю. При стремлении мощности к бесконечности напротив доля энергии после изгиба будет

стремиться к 100 %. Таким образом функция, которая описывает данную зависимость должна иметь условия стремления к нулю и 100 % при стремлении мощности к нулю и бесконечности соответственно. В данной работе используются функции следующего вида (таблица 2.2), которые удовлетворяют данным условиям.

Таблица 2.2 - Используемые уравнения корреляции

№	Name	Formula
1	Chapman	$f(x)=a*(1-e^{-bx})^c$
2	Slogistic1	$f(x)=a/(1+e^{-b(x-c)})$
3	Hill	$f(x)=a*x^b/(c^b+x^b)$

Зависимость емкости разряда от мощности разряда представлена на рисунке 2.16d. При этом наблюдается довольно линейный характер данной зависимости. Однако при описании системы с использованием нашего подхода в этой зависимости должен наблюдаться явно нелинейный характер.

Из рисунков 2.16 а-с при аппроксимации кривых уравнениями Chapman, Slogistic1 и Hill видно, что функция Slogistic1 не очень хорошо коррелирует с экспериментальными данными. Также стоит отметить, что при аппроксимации коэффициент “а” брался равным единице, т.к. только в этом случае уравнения удовлетворяют условию равенства 1 при бесконечно большой мощности.

На основании данных зависимости напряжения и коэффициента наклона от мощности разряда, проведено моделирование энергоемкости линейного участка от мощности разряда по уравнению (2.9 – 2.10).

$$E = P_i * \frac{2(U_S(P_i) - U_A(P_i))}{k(P_i) * (1 - \eta)} \quad (2.9)$$

$$E_0 = 0.1153 * e * N_A * c * V \quad (2.10)$$

где P_i - это текущее значение мощности разряда; U_S и U_A - это стартовое и среднее значение напряжения; k - коэффициент кривой разряда (определяется в соответствии с корреляционным уравнением); η - доля энергии после перегиба (определяется в соответствии с выбранным

корреляционным уравнением); c - концентрация ионов ванадия (моль/л); V - объем электролита в баках (л); e и N_A - это заряд электрона и число авогадро соответственно. При этом, критерием для определением точки преггиба напряжения является напряжение при времени, которое вдвое больше времени для среднего напряжения. При этом точкой отсечения считается напряжение 65 В.

На рисунке 2.17 представлены кривые моделирования отданной энергии батареи в зависимости от мощности разряда.

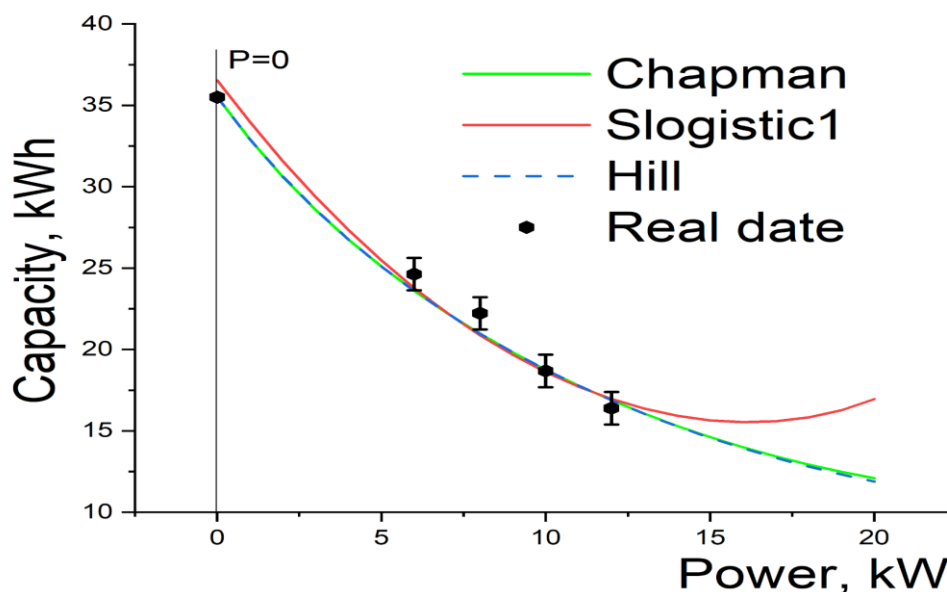


Рисунок 2.17. - Моделирование отданной энергии от мощности разряда

Представленные кривые различаются разным уравнением аппроксимации кривой емкости после изгиба от мощности разряда. Видно, что модель использующая уравнение Slogistic1 хуже других описывает поведение емкости от мощности и к тому же имеет противоречия в виде увеличения емкости после мощности в 16 кВт, что не может соответствовать действительности. Поэтому корреляционное уравнение Slogistic1 не подходит для аппроксимации. Уравнения же Charman и Hill напротив являются наиболее подходящими в данном случае и дают очень близкие результаты, совпадающие с экспериментальными данными, а также обладают хорошей предсказательной способностью. В данном случае предсказание проверялось по значению теоретической емкости электролита, которая рассчитана по уравнению (4) на основании параметров электролита. Оба уравнения показали практически полное совпадение с независимой теоретически предсказанной величиной в то время, как Slogistic1 расходится в этом предсказании на 3 %. При этом при стремлении к нулевой мощности разряда для моделей на основе Charman и Hill модель

дает значение 32.91 кВт*ч при мощности 0.1 кВт и 32.92 кВт*ч соответственно, а при мощности 0.01 кВт 35.49 дают обе модели, в то время как теоретическая емкость составляет 35.5 кВт*ч.

Различие моделей на основе Charman и Hill в том, что модель на основе Charman дает более высокие значения емкости с повышением мощности. Поэтому ход дальнейших исследования должен быть в направлении повышения мощности разряда для определения какая модель точнее описывает результаты.

Таким образом в работе разработана модель, которая позволяет приблизительно определить энергоемкость батареи при различной мощности разряда. Данная модель неплохо согласуется с теоретическими и экспериментальными параметрами батареи, и далее модель требует апробации в более широком интервале режимов разряда.

2.7. Выводы по второй главе.

1. Исследована проточная батарея при различной мощности разряда. Показано, что линейный участок кривой разряда имеет различный угол наклона при различной мощности разряда и коэффициент наклона этих кривых может быть описан с использованием Vox Lucas model, т.к. она демонстрирует хороший коэффициент Reduced Chi-Sqr около 0,9. В целом модель хорошо согласуется с теоретической емкостью и неплохо согласуется с реальной емкостью батареи при мощности разряда от 6 до 12 кВт.

2. При этом рассмотрено 3 уравнения корреляции для емкости после перегиба кривой разряда и показано, что хорошими предсказателями параметрами обладают уравнения Charman и Hill, в то время как уравнение Slogistic1 не дает корректного предсказания и расходится более чем на 3 % с независимой теоретически предсказанной величиной емкости батареи в то время как Charman и Hill модели дают значения 32.91 кВт*ч и 32.92 кВт*ч соответственно при мощности 0.1 кВт, а при мощности 0.01 кВт 35.49 дают обе модели в то время как теоретическая емкость составляет 35.5 кВт*ч.

3. Разработанная в работе модель может быть использована для анализа и моделирования промышленных систем накопления энергии на основе ванадиевых проточных батарей.

4. Проведена апробация данного подхода, данной модели на широком массиве данных зависимости емкости батареи от мощности разряда и доказана работоспособность модели.

5. 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.

б. 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).

3. РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

В главе представлена разработка преобразователей параметров электрической энергии для гибридных специализированных источников.

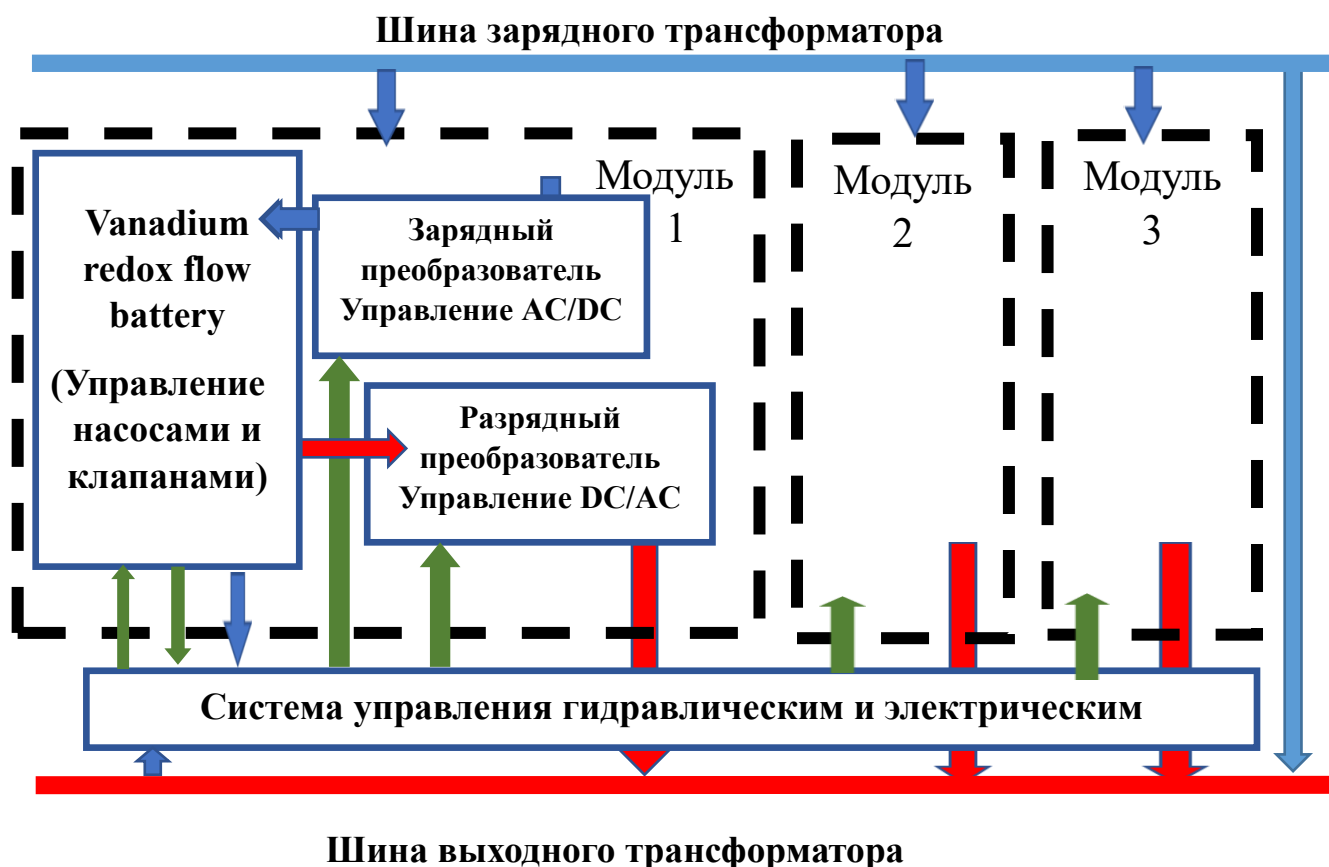


Рисунок 3.1. Модульная структура схемы включения и управления проточных накопителей

Применение СБП [5, 6] для нормального функционирования ответственных электроприемников возможно в тех случаях, когда мощность потребителей меньше располагаемой мощности альтернативного источника, а необходимая длительность обеспечения электроэнергией соответствует запасу энергии. Наиболее важной характеристикой, обеспечивающей необходимый режим потребителя является разрядная характеристика. Для обеспечения необходимого режима необходимо исследовать все факторы влияния на поведение проточного аккумулятора.

3.1. Разрядные характеристики проточных аккумуляторов

В ходе исследований получены разрядные характеристики стеков при их последовательном включении, которые приведены на рисунке 3.2.

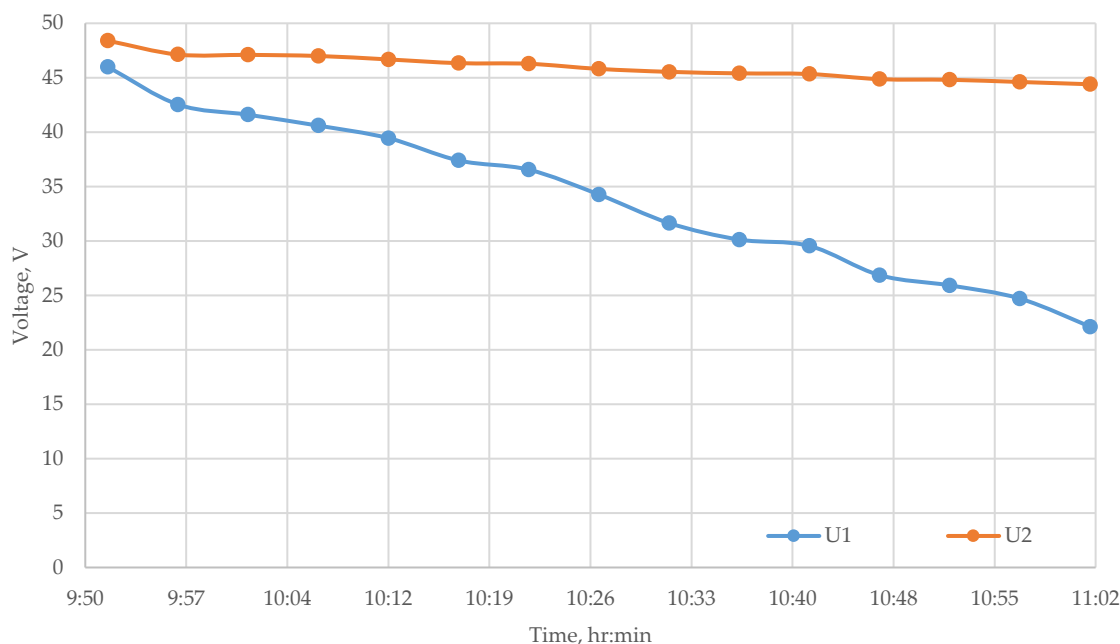


Рисунок 3.2. Разрядные характеристики стеков 1 и 2.

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:

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 мембраны и/или электродов. Степень деградации зависит от количества часов наработки стеков и условий их эксплуатации. Скорость прокачки электролита. При наличии единой гидродинамической системы для обоих стеков возникают трудности поддержания одинаковой скорости прокачки электролитов, вызванные невозможностью точной ручной настройки.

Следовательно, из рисунка 3.2 можно сделать вывод, что включать стеки на параллельную работу без дополнительных преобразователей нельзя. Работа такой системы является не эффективной, и приведет к перегрузке стека №2, а значит требуется применять специальные способы для объединения нескольких ячеек в общую систему.

3.2. Способы обеспечения эффективной параллельной работы

3.2.1. Создание и настройка единой гидродинамической системы подачи электролита

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. [54]

На Рисунке 3.3. представлена единая гидродинамическая схема, позволяющая подключить к одному комплекту баков с электролитом неограниченное количество проточных стеков.

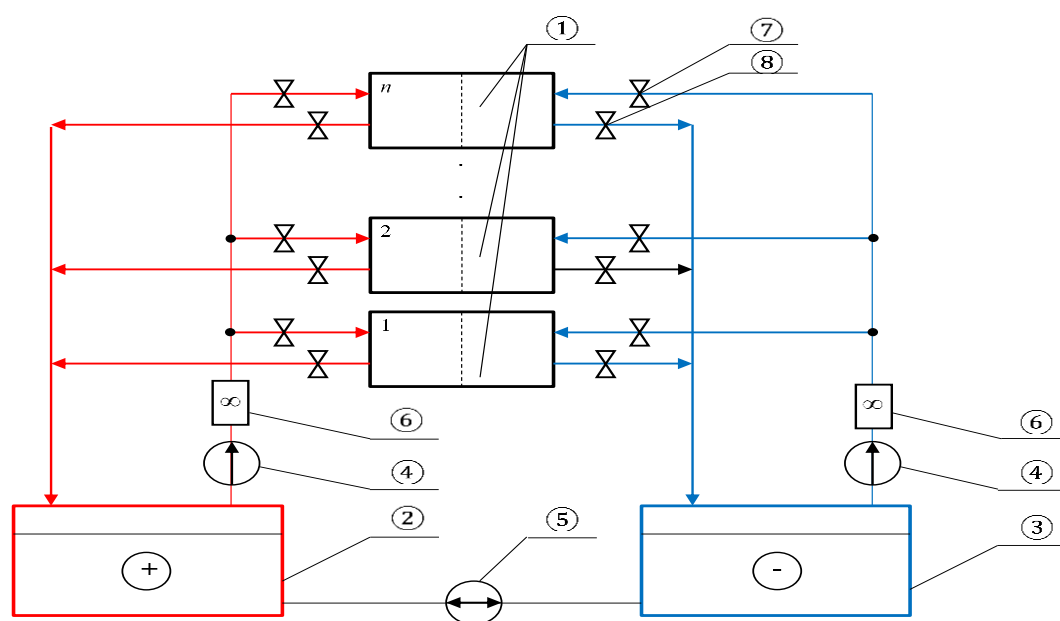


Рисунок 3.3. Гидродинамическая схема для подключения нескольких проточных стеков: 1 – стек проточной батареи (n штук); 2 и 3 – баки с электролитом; 4 – основные насосы прокачки электролита; 5 – балансирующий насос; 6 – датчики расхода электролита; 7 – входные вентили; 8 – выходные вентили.

Настройка одинаковой скорости прокачки электролита осуществляется с помощью запорных вентилей 7 от системы подачи электролита, при этом отключаются все стеки кроме одного, осуществляется настройка скорости прокачки используя входные вентили 7 и контролируя расход с помощью датчиков 6. При достижении необходимой скорости, перекрывается выходные вентили 8. Выполняется настройка для следующего стека.

3.2.2. Схема электрической части для объединения проточных аккумуляторов на параллельную работу.

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. Кроме этого, предлагается использовать единую гидродинамическую систему подачи электролита, которая без дополнительных капитальных затрат позволяет обеспечить одинаковую скорость прокачки электролита через каждый стек.

На Рисунке 3.4 приведена предлагаемая схема, позволяющая объединить проточные стеки на параллельную работу на стороне переменного напряжения.

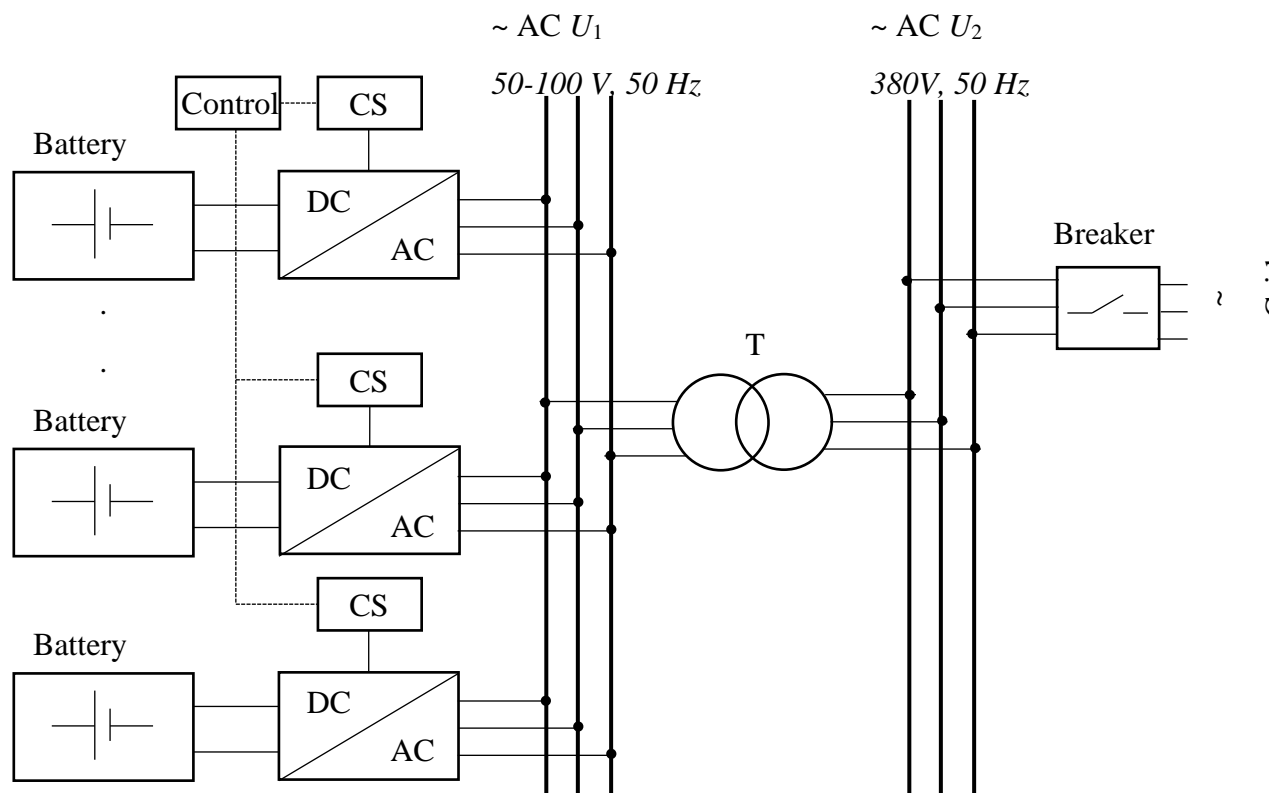


Рисунок 3.4. Функциональная схема объединения стеков на параллельную работу.

Для преобразования постоянного напряжения в переменное используется двунаправленный трёхфазный мостовой DC/AC преобразователь, принципиальная схема которого приведена на Рисунке 3.5. [28, 31, 34, 41, 42, 48, 49, 60]

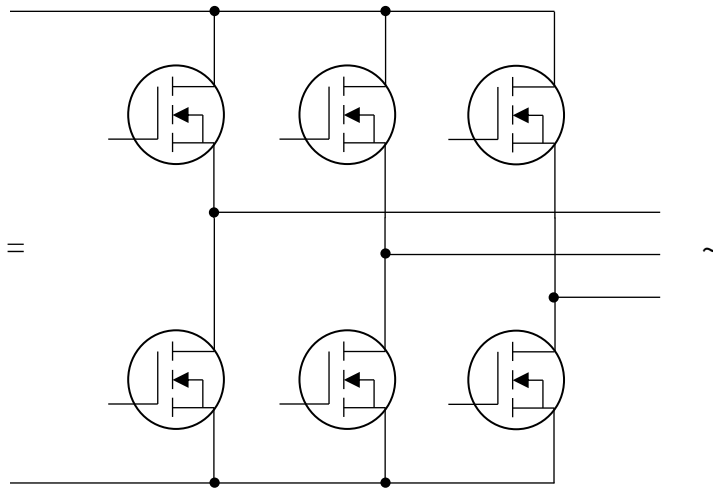


Рисунок 3.5. Трёхфазный мостовой DC/AC преобразователь.

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.[11, 15, 16, 17, 20, 21, 43, 58, 60]

Управление системой и DC/AC преобразователями осуществляется системой управления, состоящей из двух модулей: единая система задания сигнала управления и собственные блоки управления преобразователями. Единая системы 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.

3.2.3. Моделирование работы группы параллельно соединенных стеков

Для тестирования работоспособности предложенной схемы была разработана имитационная модель в Matlab Simulink параллельной работы трех ПАК с различными характеристиками. На рисунке 3.6 приведен график изменения напряжения при параллельном соединении трех стеков проточных аккумуляторов с помощью предложенной схемы.

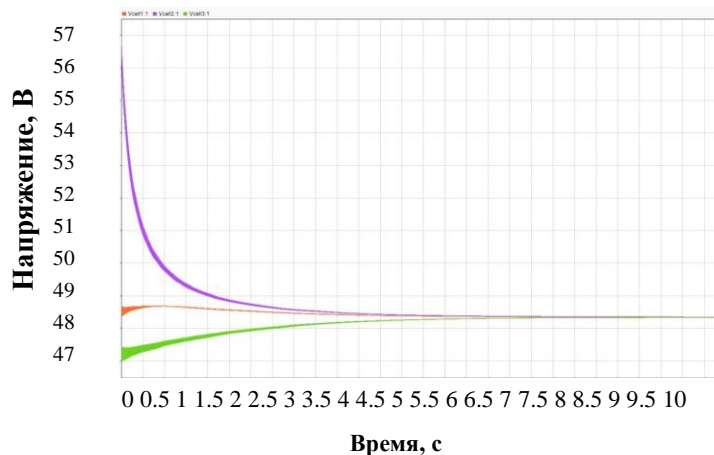


Рисунок 3.6 – Изменение напряжения ячеек при их параллельном соединении.

При объединении стеков проточных аккумуляторов на параллельную работу наблюдается различие ВАХ, что приводит к неэффективной работе ПАК при параллельной работе. При включении каждой батареи через свой DC/AC преобразователь, который работает на общую шину АС позволяет выровнять потоки мощности, устранив уравнивательные токи и сделать режим оптимальным. Видимо при небольших мощностях отдельных ПАК этим можно даже пренебречь, однако при мощностях более 10 кВт потери могут превысить 10 – 20%. [62,63, 64, 60]

3.2.4. Система бесперебойного питания СБП 15-400-100-УХЛ4

Технологической основой для использования проточных аккумуляторов, в составе системы бесперебойного питания стала система СБП «ДУБНА» (рисунок 3.7), которая выпускается серийно.

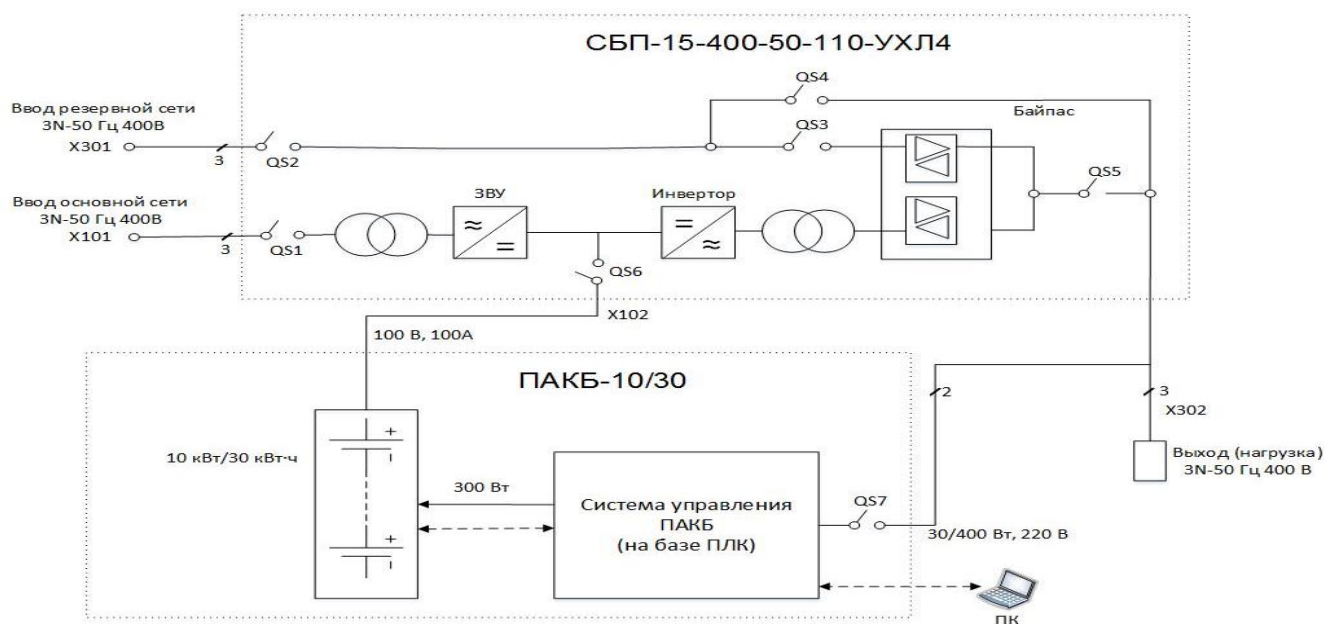


Рисунок 3.7. Система бесперебойного питания СБП 15-400-100-УХЛ4

Областью применения СПБ-ПАКБ являются приемники трехфазного тока напряжением 0,4 кВ, частотой 50 Гц первой категории электроснабжения. В том числе вычислительные комплексы, устройства автоматики и другие объекты критической инфраструктуры.

Система бесперебойного питания с проточным аккумулятором СПБ-ПАКБ-10/30 (далее СПБ-ПАКБ) состоит из двух изделий, функционально связанных между собой в единое целое:

- из шкафа системы бесперебойного питания СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 (далее СБП);

- из проточного аккумулятора ПАКБ-10/30 (далее ПАКБ), емкостью 30 кВт*час, номинальным напряжением 100В, с насосами, датчиками давления, расхода и температуры электролита, функционирующий под управлением промышленного контроллера.

Структурная схема СПБ-ПАКБ представлена на Рисунке 3.8:

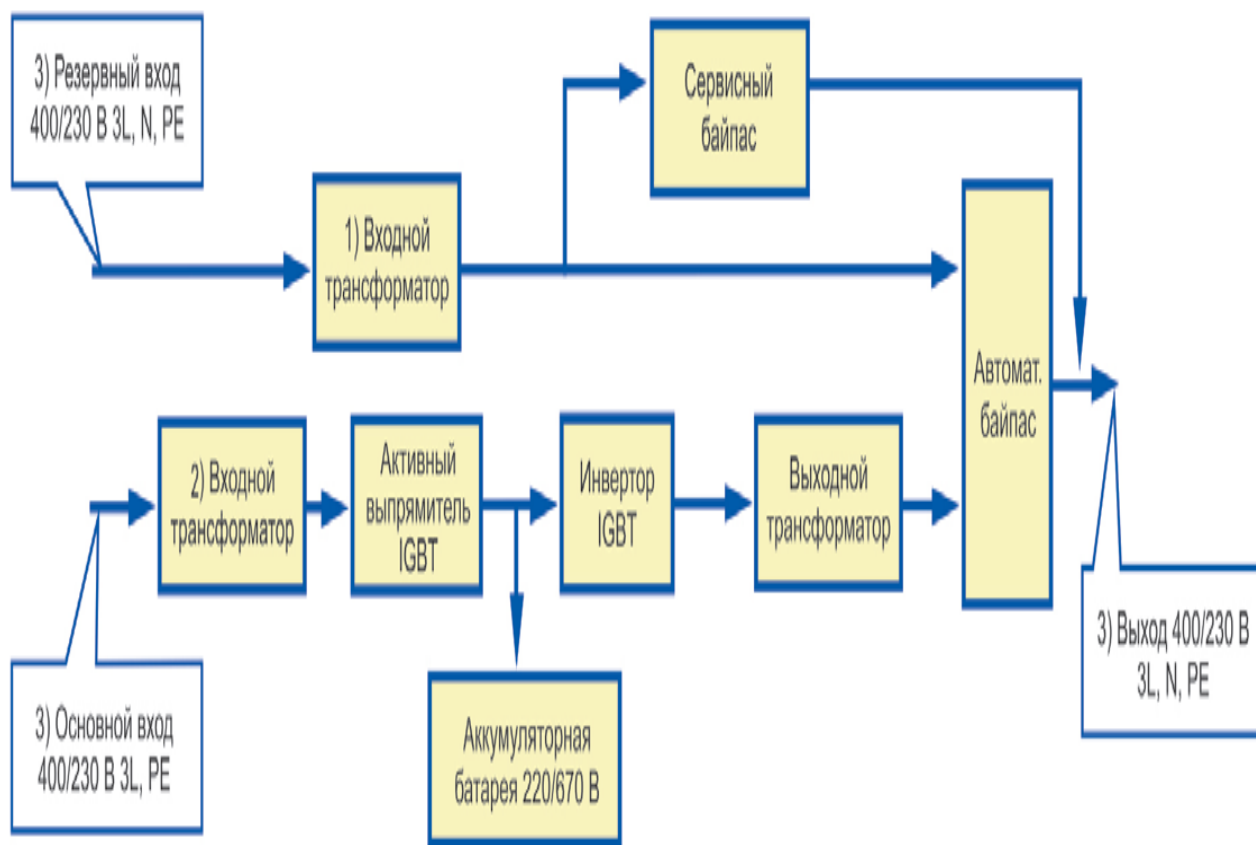


Рисунок 3.8. Структурная схема устройств СБП 15-400-100-УХЛ4

Основные элементы:

- Вводы основной и резервной сети X101 и X301 соответственно с напряжением трёхфазного тока 0,4кВ и частотой 50Гц каждый;

- Выход (нагрузка) с напряжением 0,4кВ и частотой 50 Гц;
- Зарядно выпрямительное устройство (далее ЗВУ) обеспечивает заряд аккумуляторной батареи;
 - Инвертор, преобразующий энергию шины постоянного тока в напряжение переменного тока частотой 50 Гц;
 - Байпас – сервисная обводная линия с ручными разъединителями, обеспечивающие подключение нагрузки непосредственно к резервной сети в обход инвертора;
- Проточная батарея, состоящая из следующих элементов:
 - Две ячейки проточного аккумулятора;
 - Два бака с жидким электролитом разной полярности;
 - Два насоса для перекачки электролита;
 - Датчики тока, напряжения, давления, расхода и температуры электролита, насосов и ячейки;
- Система управления ПАКБ осуществляющая сбор, анализ и хранение данных с датчиков, а также автоматическое и ручное управление насосами для прокачки электролита через ячейки проточного аккумулятора;



Рисунок 3.9. Проточный накопитель с зарядным устройством и системой управления

3.3. Выводы по третьей главе.

- 1.** 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.
- 2.** Для создания систем накопления большой мощности на основе проточных аккумуляторов требуется объединение стеков в общую систему. Прямое объединение на шине постоянного тока без использования промежуточных преобразователей недопустимо из-за разницы выходных напряжений стеков и увеличения потерь до 10 – 20%.
- 3.** Использование специальных алгоритмов управления группой преобразователей позволяет избежать длительных переходных процессов и приводит к повышению эффективности работы в целом.

4. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СО СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

В 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 с развитой инфраструктурой

В соответствии с ГОСТ Р МЭК 61427-2-2016 «Аккумуляторы и аккумуляторные батареи для возобновляемых источников энергии. Общие требования и методы испытаний. Часть 2», основные электрические характеристики аккумуляторной батареи определяются в испытаниях на постоянной мощности: «3.15. Разряд при постоянной мощности (аккумуляторных батарей) (constant power discharge of a battery): вид разряда, при проведении которого разрядная мощность, т.е. произведение тока и напряжения разряда, поддерживается постоянной, а значения тока и напряжения свободно изменяются в соответствии с поляризационными эффектами батареи».

4.1. Описание работы испытательного стенда

К основным электрическим характеристикам аккумуляторных батарей (АБ) относятся: напряжение разомкнутой цепи (электродвижущая сила), внутреннее сопротивление, емкость, удельные характеристики, саморазряд [1, 3, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Напряжение разомкнутой цепи АБ – это напряжение между ее выводами при разомкнутой внешней цепи, оно же является электродвижущей силой (ЭДС) аккумуляторной батареи (E).

Напряжение АБ при разряде меньше ее ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении АБ:

$$U = E - I_p \cdot R_{вн}, \quad (4.1)$$

где U – напряжение АБ, В,

I_p – сила тока разряда, А,

$R_{вн}$ – внутреннее сопротивление АБ, Ом.

При заряде напряжение на АБ всегда больше ЭДС и падения напряжения на полном внутреннем сопротивлении:

$$U = E + I_3 \cdot R_{вн}, \quad (4.2)$$

При стабильном токе (I_3) ЭДС возрастает и по мере заряда зарядное напряжение необходимо повышать для того чтобы полностью зарядить АБ.

Внутреннее сопротивление является важной характеристикой АБ, поскольку оно определяет возможные режимы ее работы. При малом внутреннем сопротивлении падение напряжения на самой АБ невелико, вследствие чего она может отдать в нагрузку значительную мощность. АБ, обладающая большим внутренним сопротивлением, не способна отдать во внешнюю цепь большой ток в течение короткого промежутка времени.

Емкость АБ – это количество электричества, которое может отдать полностью заряженная батарея при разряде от начального до конечного значения напряжения.

Емкость АБ (Q_p) при разряде называется разрядной:

$$Q_p = I_p \cdot t_p, \quad (4.3)$$

где t_p – время разряда, ч.

Если заряд производится при постоянном значении тока заряда I_3 , то зарядная емкость АБ:

$$Q_3 = I_3 \cdot t_3, \quad (4.4)$$

где t_3 – время заряда, ч.

Удельные характеристики АБ (удельная энергия, удельная мощность и удельная емкость) дают возможность сравнить разные по электрическим характеристикам АБ с целью определения наиболее целесообразных областей их применения. Удельная энергия – это отношение электроэнергии, которую АБ отдает во внешнюю цепь, к ее массе:

$$W_{уд} = \frac{Q \cdot U_{ср}}{G}, \quad (4.5)$$

где $W_{уд}$ – удельная энергия, Вт·ч / кг,

Q – емкость АБ, А·ч,

$U_{ср}$ – среднее напряжение разряда, В,

G – масса АБ, кг.

Удельная мощность АБ:

$$P_{уд} = \frac{I \cdot U}{G}, \quad (4.6)$$

где $P_{уд}$ – максимально достижимая мощность, Вт / кг,

I – сила допустимого разрядного тока, А,

U – напряжение АБ при данном разрядном токе, В.

Удельная емкость АБ:

$$Q_{уд} = \frac{Q_p}{G}, \quad (4.7)$$

где Q_p – разрядная емкость аккумулятора, А·ч.

Отдачей (КПД) аккумуляторной батареи $\eta_{аб}$ называется отношение емкости Q_p , отданной ею при разряде, к емкости $Q_з$, полученной при заряде, в процентах:

$$\eta_{аб} = \frac{Q_p}{Q_з} \cdot 100\%. \quad (4.8)$$

Кроме отдачи по емкости, АБ характеризуются отдачей по энергии η_w и отдачей по напряжению η_U :

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_з} \cdot 100\%, \quad \eta_U = \frac{U_p}{U_з} \cdot 100\%, \quad (4.9)$$

где W_p , U_p , $W_з$, $U_з$ – значения разрядных и зарядных энергий и напряжения соответственно.

Для определения основных характеристик ПАКБ был разработан и изготовлен испытательный стенд.

Стенд предназначен для испытания стеков проточных аккумуляторных батарей мощностью до 5 кВт в соответствии с ГОСТ IEC/TS 62282-7-1-2016 и зарядки электролита после его изготовления.

В состав стенда входят следующие элементы:

- баки для электролита с установленными патрубками (2 шт.),
- стек проточной батареи GEC-VFB-5kW (1 шт.),
- клапан аварийного сброса давления (2 шт.),
- насосы (основные) химические Kaix MDP-70RM-380 (2 шт.),
- система управления и измерения (1 шт.),
- зарядное устройство ПНЗП-М-160-75-2-УХЛ4 (1 шт.),
- испытательная нагрузка постоянного тока мощностью 5 кВт на основе реостатов балластных РБ-315 (1 шт.),
- датчики давления электролита (2 шт.),
- датчики уровня электролита (2 шт.),
- датчики расхода электролита (2 шт.),
- датчики температуры электролита (4 шт.),
- датчик температуры стека (1 шт.),
- датчики температуры насосов (1 шт.),
- каркас для монтажа и демонтажа стека (1 шт.),
- балансирующий химический насос (1 шт.),
- поддон под стенд с системой датчиков на случай аварии в стеке или гидросистеме (1 шт.),
- компьютер для управления (1 шт.).

Основные технические характеристики стенда приведены в таблице 1.

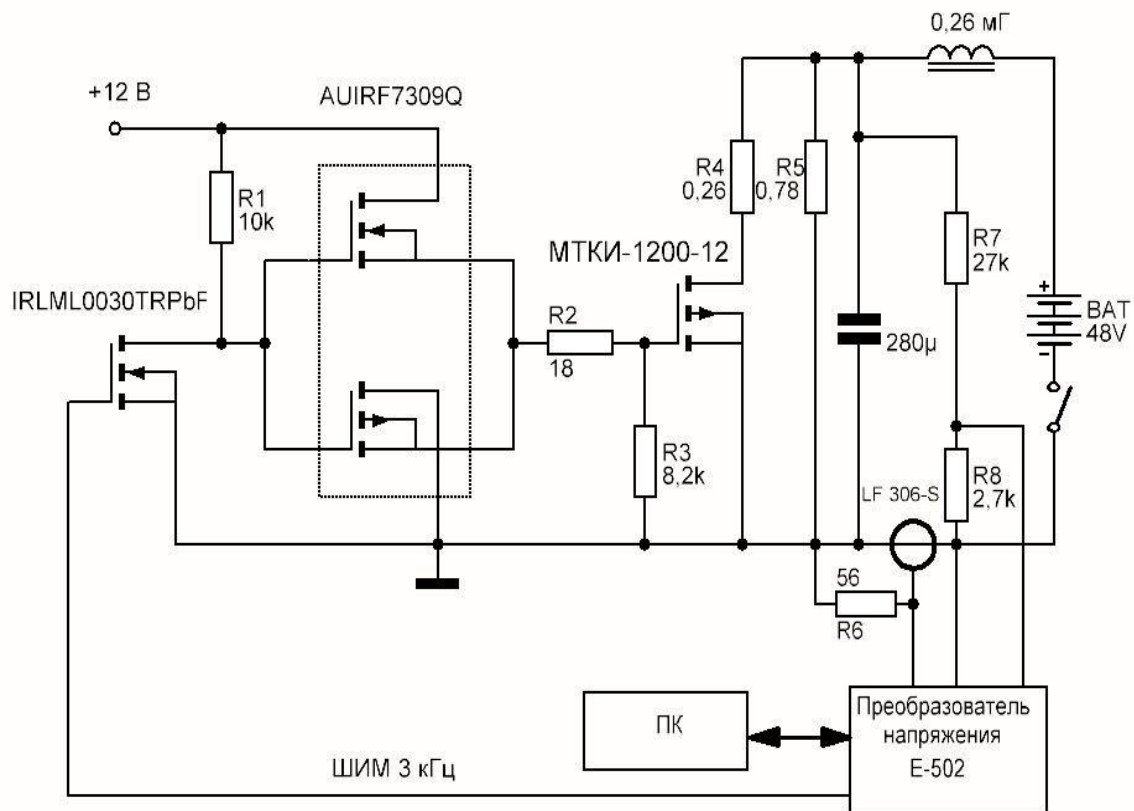
Таблица 4.1 – Характеристики стенда

Характеристика	Значение	Ед. изм.
Диапазон задаваемых расходов электролита	От 1 до 2,5	м ³ /ч
Диапазон измерения давления электролита на входе в стек	От 0,1 до 100	кПа
Объем баков с электролитом (суммарный)	400	л
Объем электролита в 2-х баках	120	л
Производительность балансирующего насоса	20	л/ч

Максимальный допустимый вес стека в заправленном состоянии	250	кг
Диапазон измеряемой температуры электролита и стека	От минус 10 до +60	°С
Погрешность измерения температуры электролита и стека	±1	°С
Погрешность измерения давления	±3	%
Погрешность измерения производительности насосов (основных)	±5	%
Габаритные размеры стенда (ДхШхВ) без учета ПНЗП и нагрузки	1300x1700x1600	мм
Номинальное напряжение питания	380	В
Максимальная производительность основных насосов	4	м ³ /ч
Максимальное допустимое давление в баках	30	кПа
Диапазон рабочих давлений в баках	От -7,5 до +7,5	кПа
Максимальная нагрузка на рабочую зону (место крепления стека)	400	кг

4.2. Управление нагрузкой проточной батареи

Частота включения резистора R4 равна 3 кГц, длительность времени включения задаётся широтно-импульсным генератором (ШИМ), реализованным в преобразователе напряжения E-502. По измеренным значениям тока и напряжения рассчитывается средняя мощность, выделяемая на нагрузке. Для поддержания постоянной мощности производится ШИМ регуляция. Управление преобразователем напряжения E-502 производится посредством программы в ПК. 7, [13, 19, 24, 28, 29, 45, 71,79].



а)



б)

Рисунок 4.1.– Схема (а) и устройства регулирования (б) испытательной нагрузки постоянного тока мощностью 5 кВт

Окно программы управления испытательной нагрузкой представлено на рисунке 4.2.

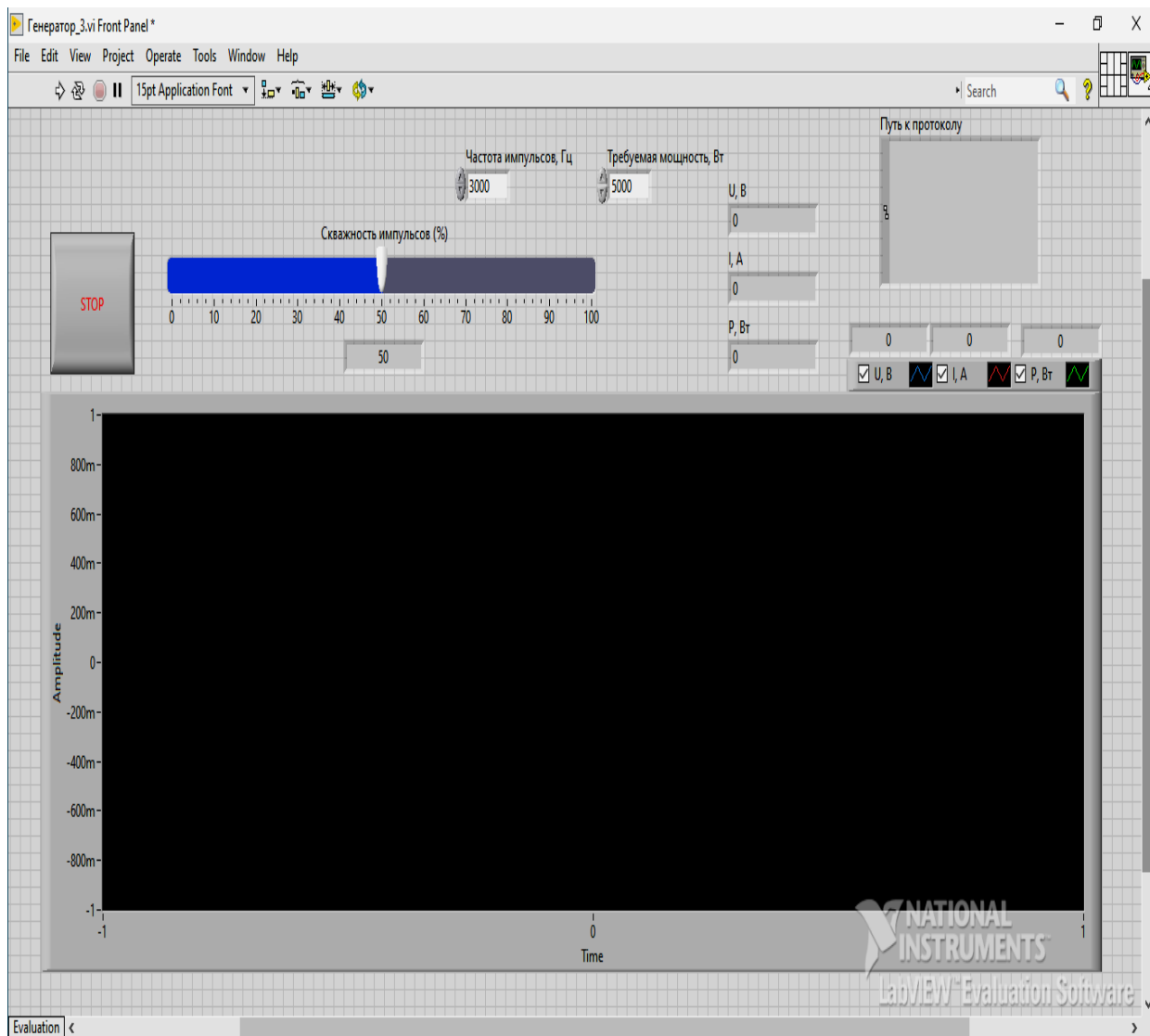
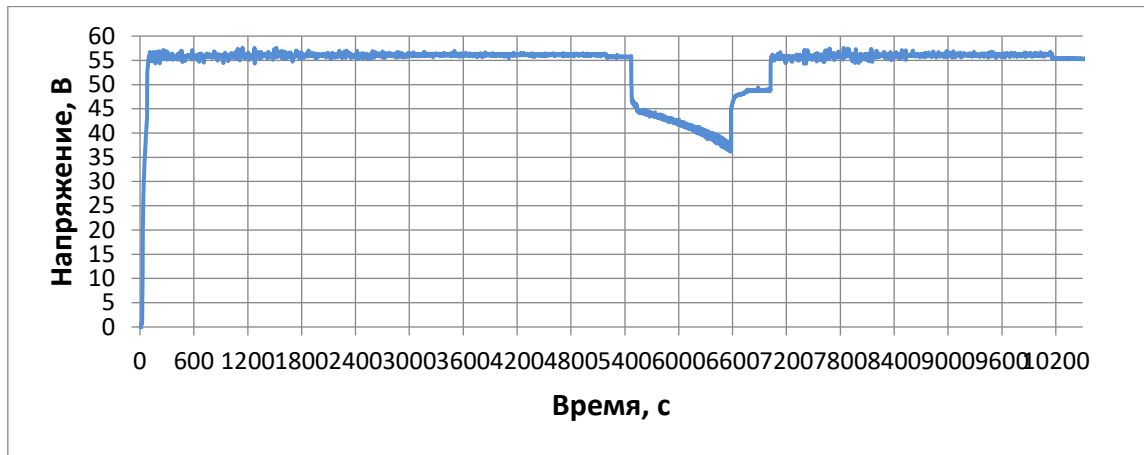


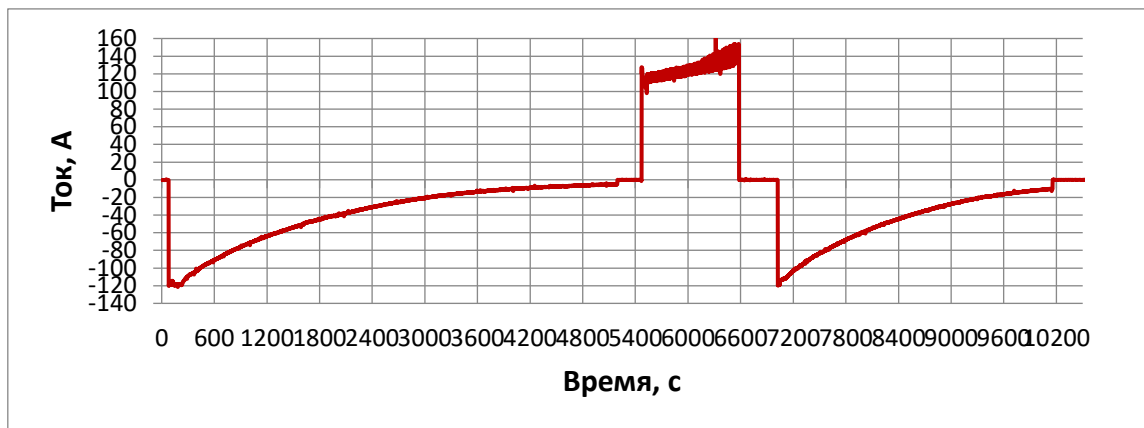
Рисунок 4.2. – Окно программы управления нагрузкой

Программа управления испытательной нагрузкой написана на языке LabVIEW. При необходимости программа управления нагрузкой может обеспечить режим разряда на постоянной величине тока разряда.

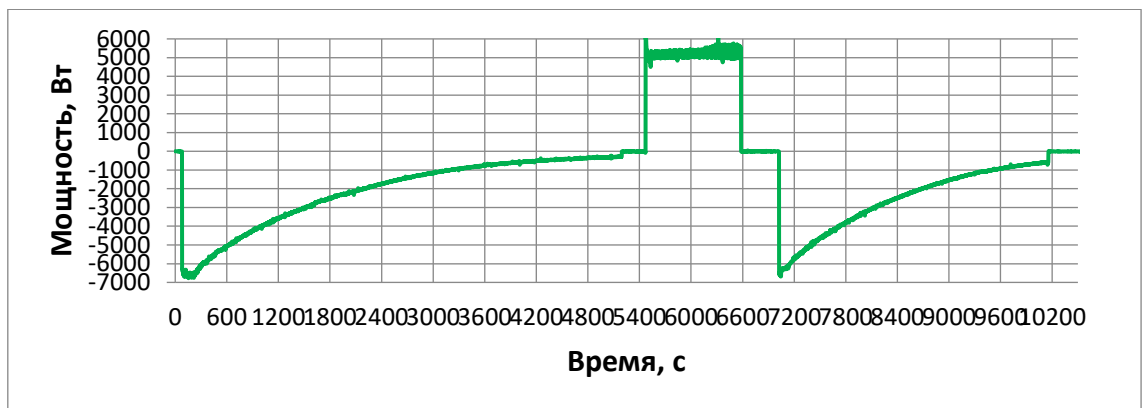
Результаты измерений заряда и разряда ПАКБ на постоянной мощности приведены на рисунке 4.3. Из рисунка 4.3. видно, что при разряде напряжение на ПАКБ снижается, ток растет, а мощность остается постоянной. По измеренным значениям можно рассчитать удельные характеристики ПАКБ.



а)



б)



в)

Рисунок 4.3.– Результаты измерений параметров ПАКБ на постоянной мощности:

а) напряжение от времени; б) ток от времени; в) мощность от времени

К основным электрическим характеристикам аккумуляторных батарей (АБ) относятся: напряжение разомкнутой цепи (электродвижущая сила), внутреннее сопротивление, емкость, удельные характеристики, саморазряд.

4.3. Управление гидросистемой электролита проточной аккумуляторной батареи

Основные технические характеристики гидравлической системы стенда приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. – Характеристики стенда

Характеристика	Значение	Ед. изм.
Диапазон задаваемых расходов электролита	От 1 до 2,5	м ³ /ч
Диапазон измерения давления электролита на входе в стек	От 0,1 до 100	кПа
Объем баков с электролитом (суммарный)	400	л
Объем электролита в 2-х баках	120	л
Производительность балансирующего насоса	20	л/ч
Максимальный допустимый вес стека в заправленном состоянии	250	кг
Диапазон измеряемой температуры электролита и стека	От - 10 до +60	°С
Погрешность измерения температуры электролита и стека	±1	°С
Погрешность измерения давления	±3	%
Погрешность измерения производительности насосов (основных)	±5	%
Габаритные размеры стенда (ДхШхВ) без учета ПНЗП и нагрузки	1300x1700x1600	мм
Номинальное напряжение питания	380	В
Максимальная производительность основных насосов	4	м ³ /ч
Максимальное допустимое давление в баках	30	кПа
Диапазон рабочих давлений в баках	От -7,5 до +7,5	кПа
Максимальная нагрузка на рабочую зону (место крепления стека)	400	кг

Схема стенда с системой управления и измерения (обозначена пунктиром) показана на рисунке 4.4.

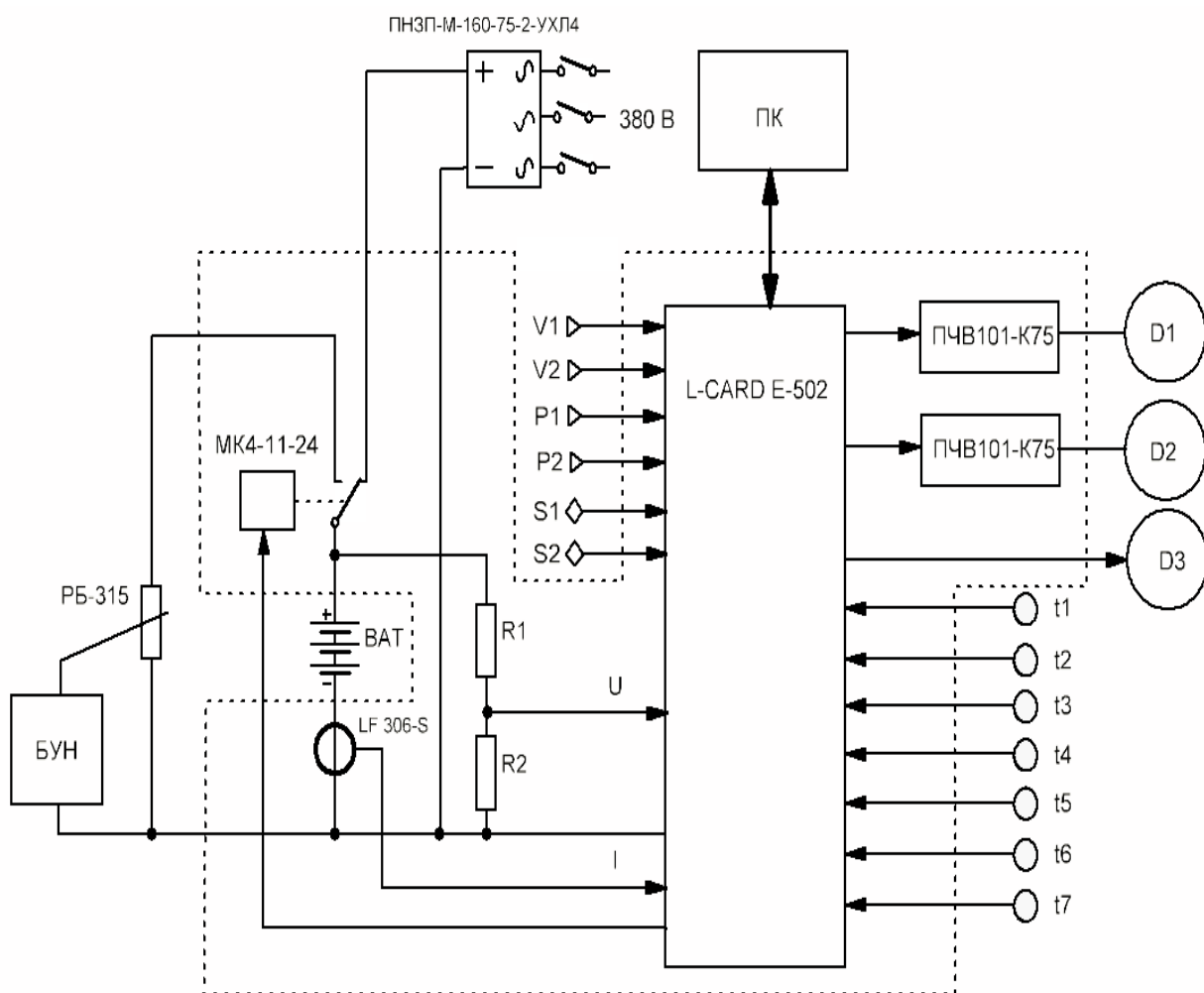


Рисунок 4.4. –Схема управление стендом

ВАТ – стек проточной батареи; D1, D2 – двигатели насосов (основных); ПЧВ101-К75 – преобразователи частоты векторные; D3 – балансирующий насос; ПНЗП-М-160-75-2-УХЛ4 – зарядное устройство; L-CARD E-502 – преобразователь напряжения; РБ-315 – испытательная нагрузка постоянного тока с блоком управления нагрузкой БУН; P1, P2 – датчики давления электролита; S1, S2 – датчики уровня электролита; V1, V2 – датчики расхода электролита; t1÷t7 – датчики температуры; R1, R2 – делитель напряжения; LF 306-S – датчик тока; МК4-11-24 – коммутатор; ПК – персональный компьютер

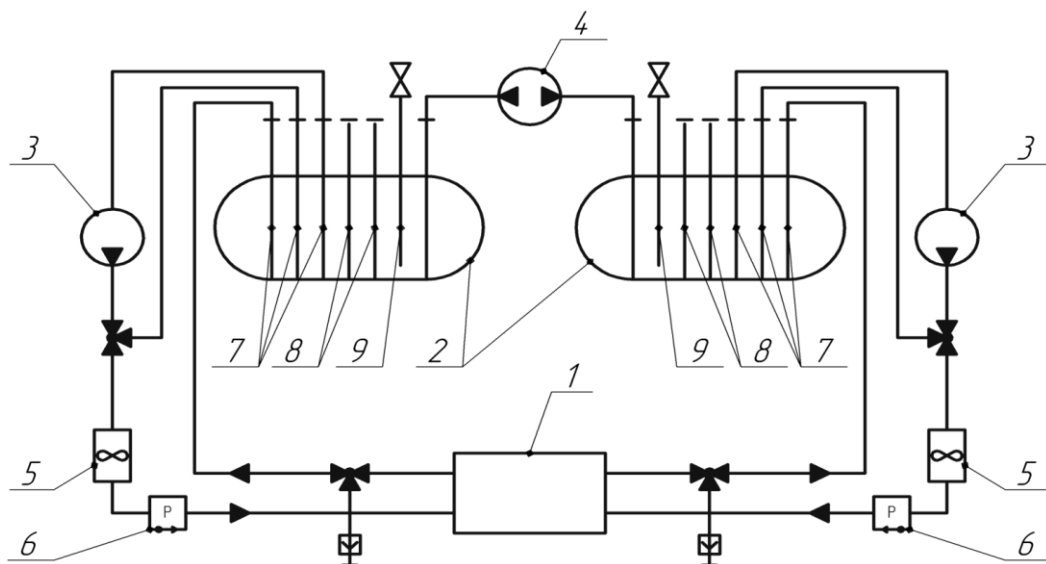


Рисунок 4.5. – Гидродинамическая схема стенда

1 – стек проточной батареи; 2 – баки с электролитом; 3 – основные насосы прокачки электролита; 4 – балансирующий насос; 5 – датчики расхода электролита; 6 – датчики давления; 7 – выходные патрубки Р-32; 8 – патрубки с выходом в виде штуцера; 9 – патрубки КД-10 с клапанами сброса давления

4.1. Реализация системы управления на основе ПЛК200

Система управления проточной аккумуляторной батареей на основе ПЛК200 реализована в среде разработки *CODESYS*. Разработаны графический интерфейс пользователя и основные функции мониторинга, сигнализации и управления. Вся система разработана на основе технических средств, представленных выше.

Дополнительные модули

Для начала стоит описать подключение дополнительных модулей, подключение которых было необходимо в рамках данной системы. Подключение модулей происходит через порты *RS-485* по протоколу *Modbus*.

Перед тем как работать с модулями их нужно сконфигурировать. Программу «Конфигуратор» можно скачать с сайта фирмы «Овен», на том же сайте есть подробные мануалы по конфигурации. Или можно скачать готовые шаблоны с того же сайта, далее нужно установить шаблон и настроить. Для настройки шаблона требуется выбрать адрес модуля и привязать

переменные к нужным каналам. Таким образом подключены: два модуля МВ110, модуль МУ110, а также два преобразователь частот.

Графический интерфейс пользователя

Разработка интерфейса самая простая из выполненных задач. Поскольку в среде разработки *CODESYS* предусмотрена возможность визуализации.

Для создания интерфейса во вкладке визуализации есть окно элементов, где содержатся все нужные разработчику детали интерфейса: кнопки, окна отображения информации и так далее. Выбранный элемент нужно просто перетащить на окно визуализации и масштабировать его. На рисунке 4.6 изображен интерфейс системы управления на основе ПЛК200.

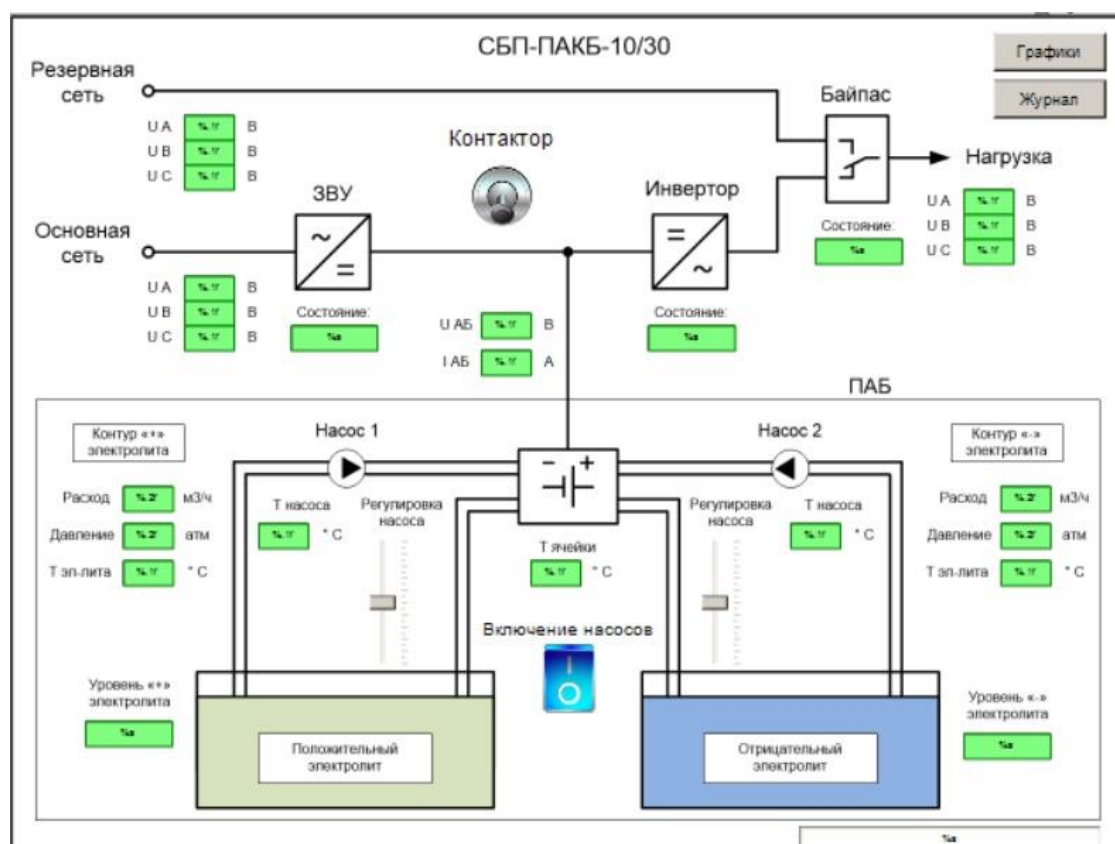


Рис. 4.6. Интерфейс системы управления на основе ПЛК200

Далее остается настроить графический интерфейс в соответствии с необходимыми требованиями и привязать к элементам значения для выдачи управляющего воздействия или отображения информации. Например, текстовому окну нужно присвоить переменную, из которой будет выводиться информация.

На интерфейсе присутствуют кнопки «журнал» и «графики». При нажатии на кнопку «журнал» открывается интерфейс, который отображает все события, происходящие во время

работы батареи (рисунок 4.7). Взаимодействие с кнопкой «графики», пользователь перейдет на интерфейс, отображающий динамические изменения тока и напряжения аккумуляторной батареи (рисунок 4.8).

Журнал событий

	Дата и время	Событие
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		

Рисунок 4.7. Журнал событий

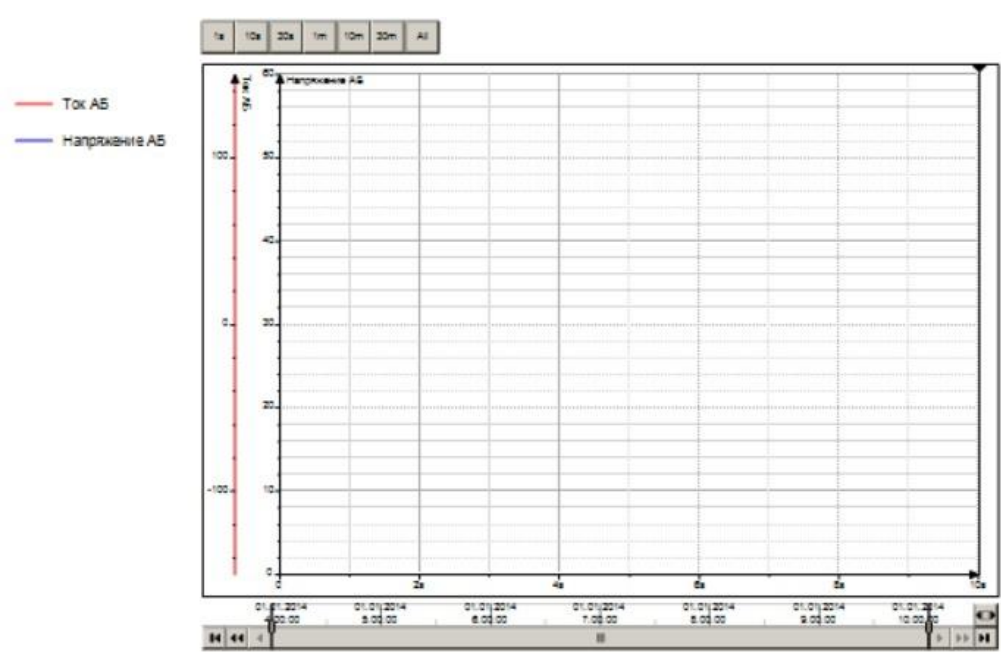


Рисунок 4.8. Графики тока и напряжения

Подключение портов

Отдельно стоит сказать о подключении портов. В среде разработки *CODESYS* все порты изначально имеют свои переменные и для получения информации разработчику требуется приравнять свои переменные к переменным портов

```

(^ Чтение дискретных входов ПЛК ^)
GlobalVars.Sign_Fluid_Level[0] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi01;
GlobalVars.Sign_Fluid_Level[1] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi02;
GlobalVars.Sign_Fluid_Out[0] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi03;
GlobalVars.Sign_Fluid_Out[1] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi04;

```

Сигнализация

В систему сигнализации входят: сигнализация о протечке и понижении уровня положительно и отрицательно заряженных электролитов.

Сигнализация о протечке электролита происходит при помощи поддона размещенном под баком с электролитом. В данном поддоне размещены два контакта. Когда происходит протечка данные контакты замыкаются и на дискретный вход поступает сигнал о изменении состояния. Программа определяет в баке с каким электролитом произошла протечка После сигнал поступает на интерфейс, где загорается лампочка утечки положительного или отрицательного электролита.

```

// Утечка электролита из бака
FOR k := 0 TO 1 DO
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k], Buf_Sign_Fluid_Out[k]) = 1 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Утечка положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Утечка отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Out[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k], Buf_Sign_Fluid_Out[k]) = 2 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Нет утечки положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Нет утечки отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Out[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
END_FOR

```

Сигнализация о понижении уровня электролита работает следующим образом: на внешней стенке бака с электролитом установлена датчик *XKC-Y25-PNP*, когда датчик регистрирует понижение уровня электролита, на дискретный вход поступает сигнал о изменении состояния, далее программа определяет в каком баке понизился уровень. После сигнал поступает на интерфейс, где загорается индикатор понижения уровня положительного или отрицательного электролита.

```

// Снижение уровня электролита
FOR k := 0 TO 1 DO
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k], Buf_Sign_Fluid_Level[k]) = 1 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Снижение уровня положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Снижение уровня отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Level[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k], Buf_Sign_Fluid_Level[k]) = 2 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Нормальный уровень положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Нормальный уровень отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Level[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
END_FOR

```

Управление

Система управления включает в себя следующие функции:

1. Функция включения и выключения насосов;
2. Функция управления режимами работы насосов;
3. Функция переключения режимов работы батареи:
 - a. Заряд;
 - b. Разряд.

Включение и выключение насосов происходит при нажатии на кнопку на интерфейсе. Дискретные входы передают электрический сигнал на устройства и насосы включаются. Программа обрабатывает данное действие и передает статус в журнал.

```

// Включение/отключение насосов
IF IsChange(GlobalVars.Pump_IO, Buf_Pump_IO) = 1 THEN
  ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
  ArrTable[TableIndex].Event := "Включены насосы";
  Buf_Pump_IO := GlobalVars.Pump_IO;
  TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF IsChange(GlobalVars.Pump_IO, Buf_Pump_IO) = 2 THEN
  ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
  ArrTable[TableIndex].Event := "Отключены насосы";
  Buf_Pump_IO := GlobalVars.Pump_IO;
  TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF

```

Изменение режимов работы насосов происходит при взаимодействии с бегунками, расположенными на интерфейсе. При изменении положения бегунка через аналоговый выход

подается сигнал на преобразователь частот, который преобразовывает данный электрический сигнал и передает его на насосы для изменения мощности их работы.

Включение и выключение контактора происходит за счет переключения тумблера на интерфейсе программы. При переключении тумблера меняется состояние работы батареи с заряда на разряд и наоборот. Все действие анализируется программой и заносится в журнал.

```
// Включение/отключение контактора
IF IsChange(GlobalVars.Kont_IO, Buf_Kont_IO) = 1 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    ArrTable[TableIndex].Event := "Включен контактор (батарея подключена к ЗВУ)";
    Buf_Kont_IO := GlobalVars.Kont_IO;
    TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF IsChange(GlobalVars.Kont_IO, Buf_Kont_IO) = 2 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    ArrTable[TableIndex].Event := "Отключен контактор (батарея подключена к нагрузке)";
    Buf_Kont_IO := GlobalVars.Kont_IO;
    TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF TableIndex > 100 THEN
    TableIndex := 0;
END_IF
```

Мониторинг

Система мониторинга представляет собой совокупность измерительных устройств, которые предоставляют контроллеру следующую информацию:

- напряжение на выводах проточной аккумуляторной батареи;
- ток проточной аккумуляторной батареи;
- расход положительного и отрицательного электролита;
- давление в контурах прокачки положительного и отрицательного электролита;
- температуры положительного и отрицательного электролита;
- температура ячеек ПАКБ.

Кроме того, предусмотрена сигнализация о ненормальных и аварийных режимах работы:

- повышение температуры положительного и отрицательного электролита, ячеек проточной аккумуляторной батареи;
- выход напряжения проточной аккумуляторной батареи за границы диапазон допустимых значений;

- выход расхода положительного и отрицательного электролита за границы диапазона допустимых значений;
- выход давления в контурах прокачки положительного и отрицательного электролита за границы диапазона допустимых значений.

Все измерительные устройства подключены схожим образом. Измерительное устройство подключается к аналоговым входам модулей МВ110, на которые периодически передает электрический сигнал с информацией о каком-либо измерении. Программа обрабатывает поступивший сигнал и проверяет его на соответствие заданным нормам. Далее программа заносит состояния измерений в журнал.

```
// Температура АБ
IF IsChange(GlobalVars.Warn_Temp_Bat, Buf_Warn_Temp_Bat) = 1 THEN
  ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
  ArrTable[TableIndex].Event := "Температура проточной ячейки выше допустимой";
  Buf_Warn_Temp_Bat := GlobalVars.Warn_Temp_Bat;
  TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF IsChange(GlobalVars.Warn_Temp_Bat, Buf_Warn_Temp_Bat) = 2 THEN
  ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
  ArrTable[TableIndex].Event := "Температура проточной ячейки в норме";
  Buf_Warn_Temp_Bat := GlobalVars.Warn_Temp_Bat;
  TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
```

4.5. Выходные характеристики проточного аккумулятора

На рисунке 4.9 представлены кривые тока и напряжения при заряде и разряде для режима №5. Расчет КПД по энергии из графиков проводился по формуле (4.10), а расчет КПД по заряду - по формуле (4.11).

$$\text{КПД}(E) = \frac{\int_0^{t_{Dch}} U_{Dch}(t) I_{Dch}(t) dt}{\int_0^{t_{Ch}} U_{Ch}(t) I_{Ch}(t) dt} \quad (4.10)$$

$$\text{КПД}(Q) = \frac{\int_0^{t_{Dch}} I_{Dch}(t) dt}{\int_0^{t_{Ch}} U_{Ch}(t) I_{Ch}(t) dt} \quad (4.11)$$

Где $\text{КПД}(E)$ и $\text{КПД}(Q)$ - КПД по энергии и заряду соответственно; I_{Dch} и I_{Ch} - это токи разряда и заряда соответственно; U_{Dch} и U_{Ch} - это напряжения разряда и заряда соответственно; t_{Dch} и t_{Ch} - это время разряда и заряда соответственно.

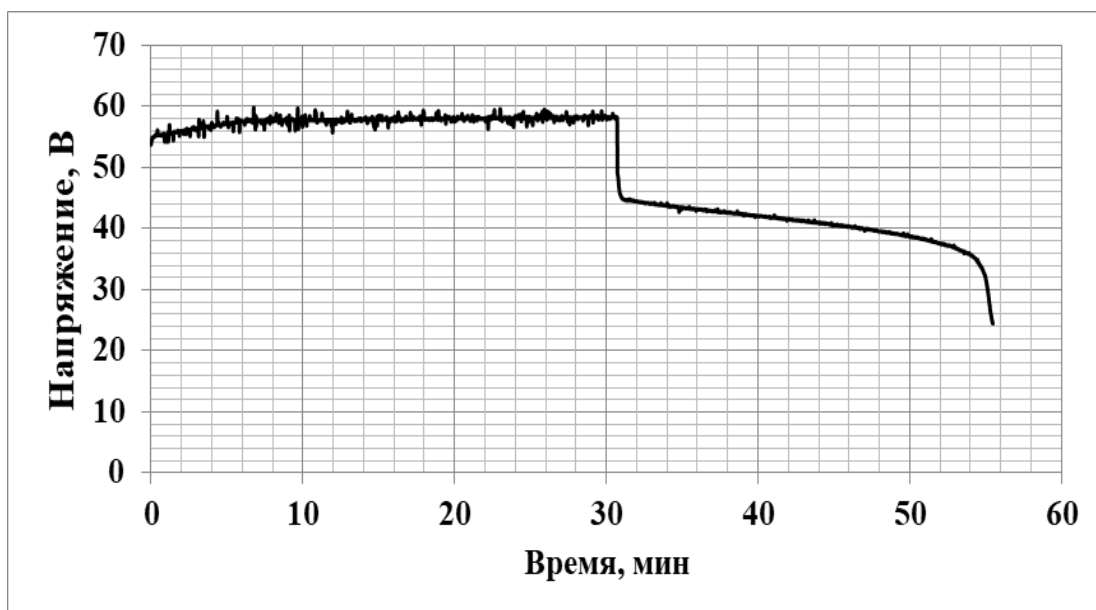
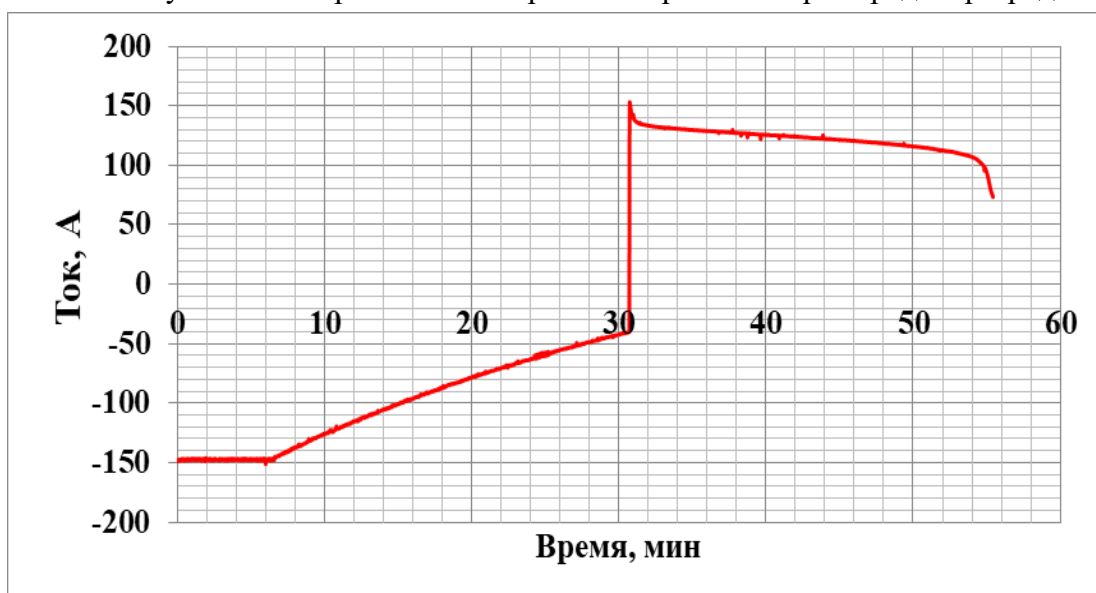


Рисунок 4.9. - Кривая тока и кривая напряжения при заряде и разряде



Как видно из рисунка 4.9 при напряжении разряда на стеке 33-34 В и токе 100 А начинается перегиб, что свидетельствует об окончании разряда. Таким образом разброс между напряжением заряда и разряда составляет 24-25 В, что составляет 43 % от напряжения заряда. Такой разброс напряжений требует специальных конструкций инверторов.

На рисунке 4.10. представлены кривые температуры для режима №5.

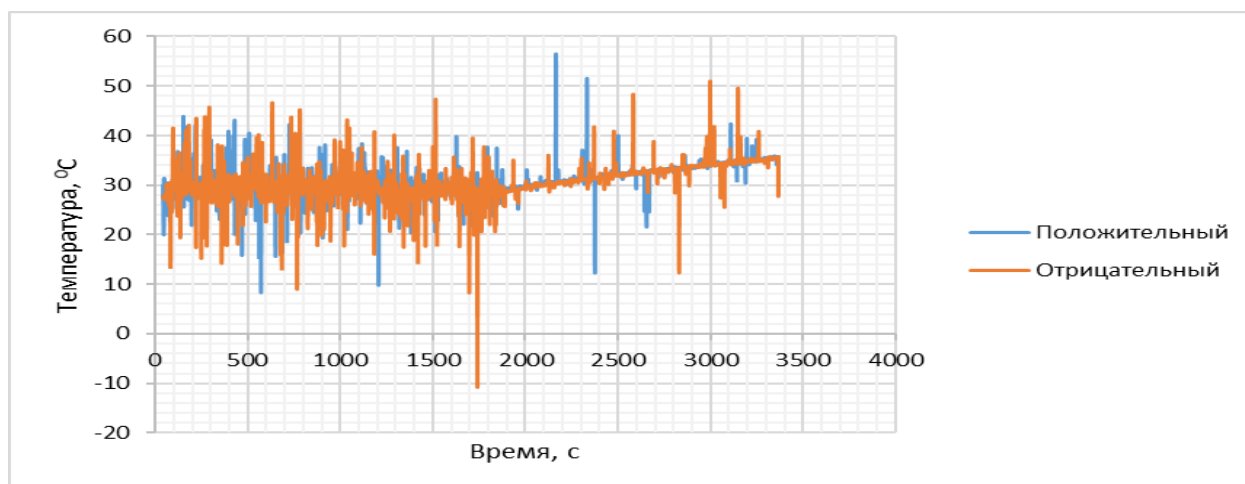


Рисунок 4.10. - Кривые изменения температуры электролита со временем

Видно, что температура для положительного электролита растет быстрее, чем для отрицательного электролита. Такая тенденция наблюдается для всех режимов. Как известно для данных батарей, помимо выделения тепла из-за электрического сопротивления в данных накопителях существует кроссовер электролита [10]. Ввиду того, что V^{2+} и V^{3+} имеют меньший диаметр, чем ионы VO_2^+ и VO^{2+} и потому переток ионов из бака с отрицательным электролитом в бак с положительным электролитом сильнее, чем в противоположном направлении. Это, скорее всего и вызывает дополнительный перегрев положительного электролита. Скачки температуры скорее связаны с электромагнитными помехами от движущегося электролита. Расхождение в температуре между положительным и отрицательным электролитами составляет от 7 до 11 %.

В таблице 4.3 приведены расчеты КПД по энергии, температуры электролита, среднего тока разряда.

Таблица 4.3. – Полученные параметры на основе проведенных испытаний

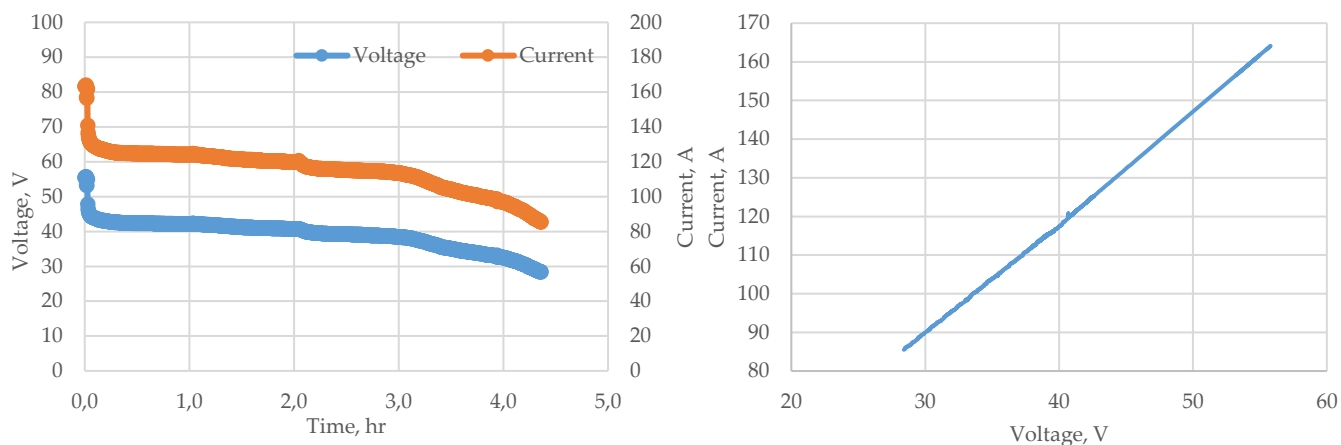
№	Ток разряда, А	T+, °C	T-, °C	КПД (Q), %	КПД (E), %	Емкость разряда, кВт*ч
1	99	6,1	5,5	91,2	68,4	2,16
2	101	5,9	5,3	89,8	68,9	2,25
3	98	5,0	4,6	82,3	64,0	1,71
4	100	5,9	5,5	92,5	68,3	2,09
5	122	5,7	5,3	98,1	69,9	2,05

Сравнивая разные скорости прокачки электролита (режим № 1 и № 2) видно, что скорость прокачки практически не влияет на КПД стека, что может быть объяснено отсутствием влияния скорости прокачки электролита на кроссовер электролита через мембрану и перенапряжение на электродах. Однако повышение скорости прокачки незначительно повышает емкость батареи, что связано с более полным использованием электролита. Номинальное значение скорости прокачки, которое дает завод изготовитель стека $2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Снижение напряжение заряда, как видно из данных режима №2 и №3, приводит к резкому (на 24 %) снижению емкости батареи и снижению КПД (на 4,9 %) стека. Снижение КПД во многом связано с падением эффективности по заряду. Для данного образца (режим №3) она составляет 82,0 %, что значительно ниже других образцов, где она превышает 90 %. Низкая кулоновская эффективность может быть связана с высоким кроссовером электролита ввиду того, что данный режим заряда занимал почти в 2 раза больше времени на заряд, что и привело к большим потерям при заряде и к тратам лишней энергии при заряде, а это снизило общий КПД. Таким образом для данных батарей снижение рабочего напряжения неуклонно ведет к снижению КПД.

Интересен и тот факт, что при перегрузке в 1,5 раза при заряде (режимы №4 и №5) батарея не только сохраняет свой высокий КПД, но и практически не теряет в емкости по сравнению с номинальными режимами (режим №2). Повышение КПД с увеличением тока разряда, как и в предыдущем случае связано со снижением времени и как следствие снижение кулоновских потерь (для режима №5 кулоновский КПД составил 98,1 %, против кулоновского КПД режима №4, который составил 92,5 %). Снижение же емкости, хоть и не значительное, это следствие неполного заряда батареи на начальном этапе. Таким образом видно, что проточная ванадиевая батарея может хорошо работать в режиме перегрузки без существенных потерь в эффективности. Это также демонстрирует хорошую совместимость данного стека с разработанным и используемым электролитом.

На Рисунке 4.10. приведены разрядные характеристики проточного стека, а также его I-V характеристика, полученные на испытательном стенде.



(a)

(b)

Рисунок 4.11. Характеристики стека GEC-VFB-5kW: (a) разрядная; (b) I-V характеристика.

Из Рисунка 4.11 видно, что I-V характеристика стека GEC-VFB-5kW в области его рабочих параметров линейна. Длительность разряда составила 4,5 ч.

Также были проведены опыты для оценки влияния скорости прокачки электролита на характеристики стека. На Рисунке 4.12. приведена кривая мощности стека в зависимости от скорости течения электролита через стек

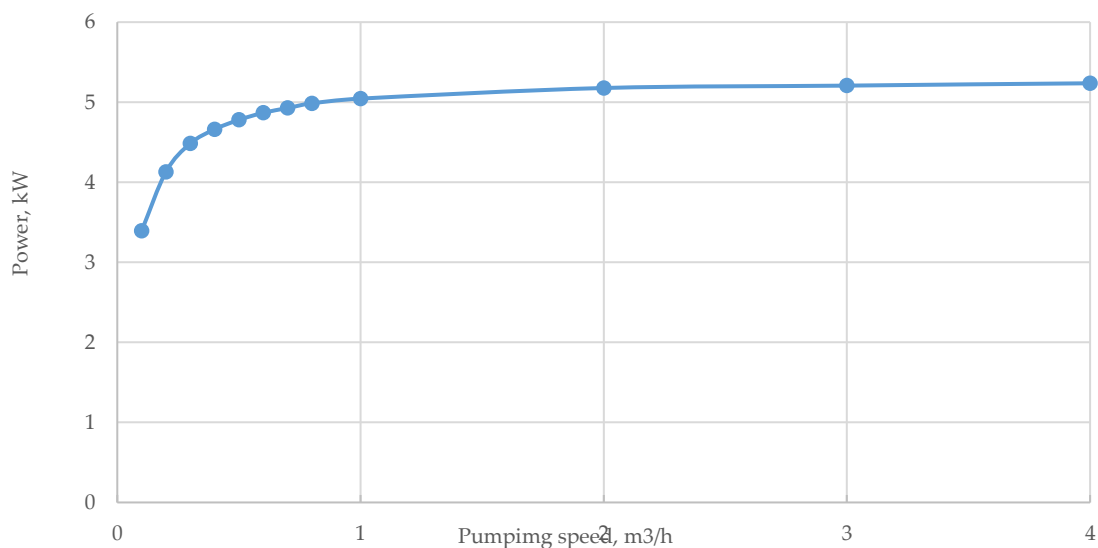


Рисунок 4.12. Зависимость мощности стека от скорости течения электролита.

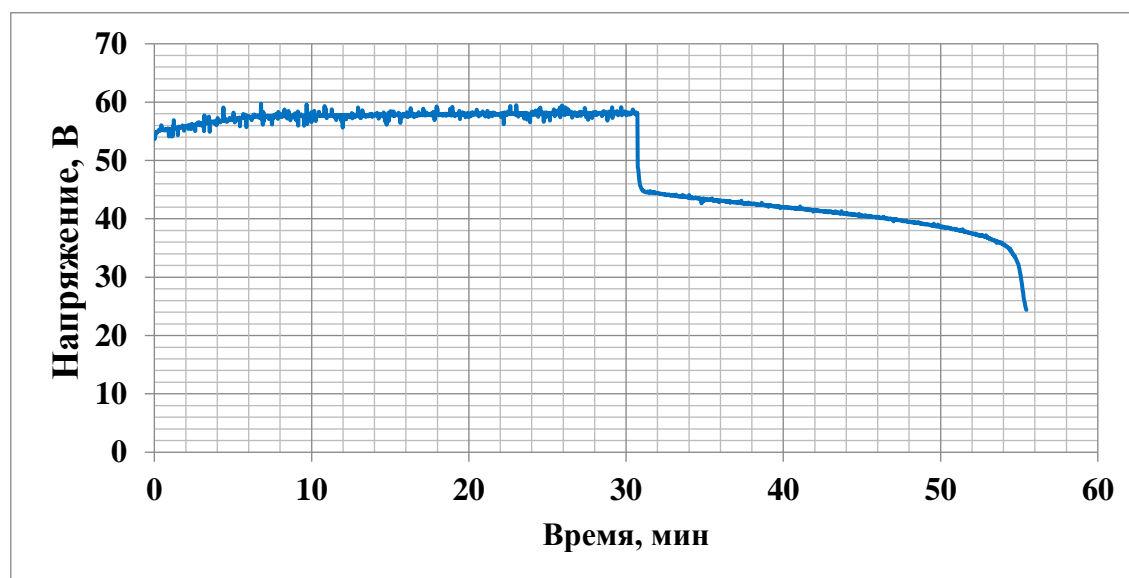
При низких скоростях прокачки электролита (до 1 м³/ч), скорость оказывает существенное влияние на мощность стека. После достижения скорости прокачки электролита 1 м³/ч мощность стека изменяется незначительно от скорости течения электролита.

Таким образом, скорость прокачки электролита может существенно влиять на его выходные характеристики и эффективность его работы.

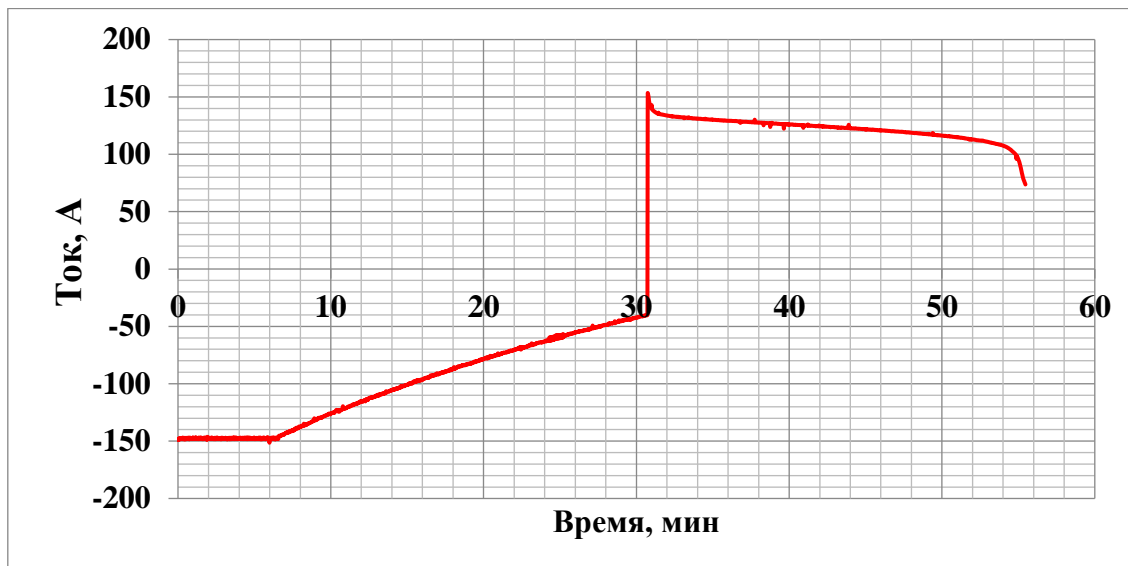
4.6. Нагрузочные испытания проточной аккумуляторной батареи.

Результаты измерений записывались в текстовые файлы в формате LVM для хранения на компьютере, откуда потом считывались в MS Excel для обработки и построения графиков. Исходные данные испытаний в виде распечаток приведены в приложении Б к этому отчету, а в настоящем разделе кратко представлены основные результаты испытаний.

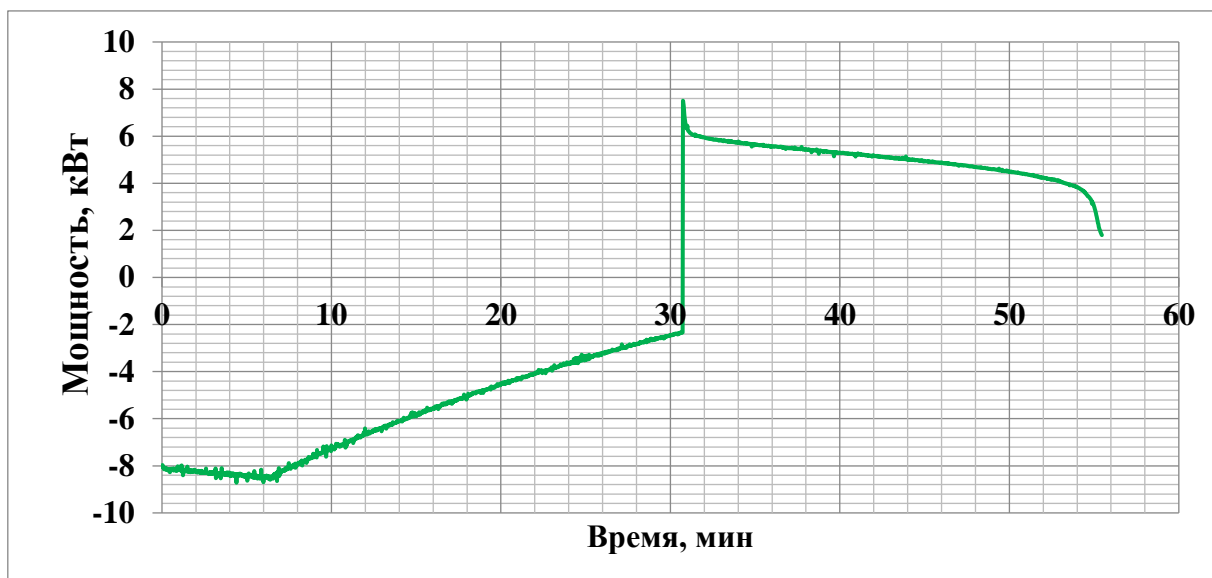
Как видно из рисунка 4.13, в течение первых 6 минут происходил заряд ячейки с ограничением тока на уровне 150 А (максимально допустимая величина тока стека по данным производителя). Далее при снижающемся токе заряда поддерживалось напряжение на уровне 58 В. Полное время заряда составило 30 минут, после чего ПАКБ была отключена от зарядного устройства и переключена на нагрузку. Из рисунка 16, б, в, следует, что в начале разряда пиковая мощность стека достигла 8 кВт, а максимальная величина тока – 150 А. При этом следует обратить внимание на резкое падение напряжения (с 58 В до 44 В), вызванное достаточно большим внутренним сопротивлением ячеек ПАКБ (0,07 Ом).



а)



б)



в)

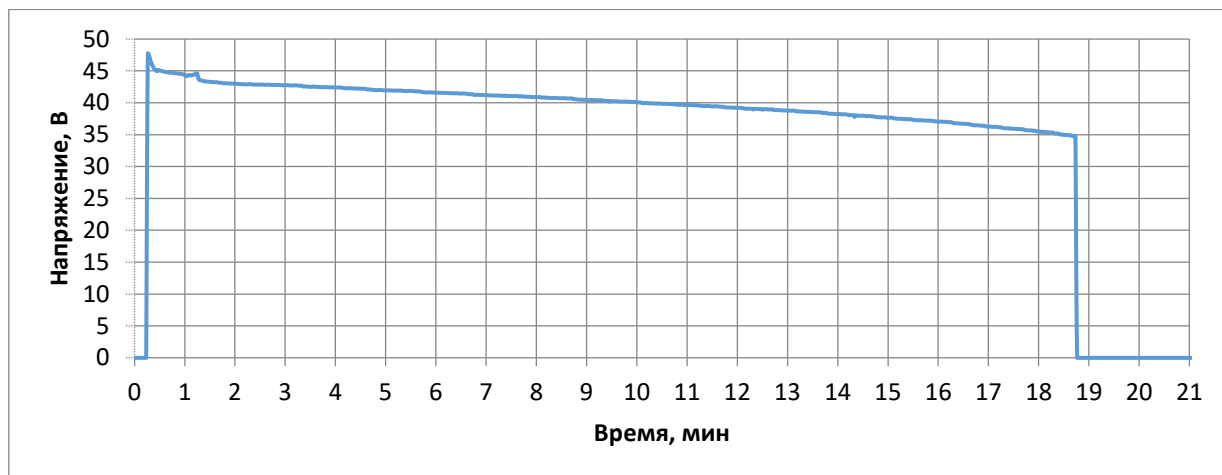
Рисунок 4.13. – Результаты испытаний ПАКБ при разряде на нагрузку с постоянным сопротивлением

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.

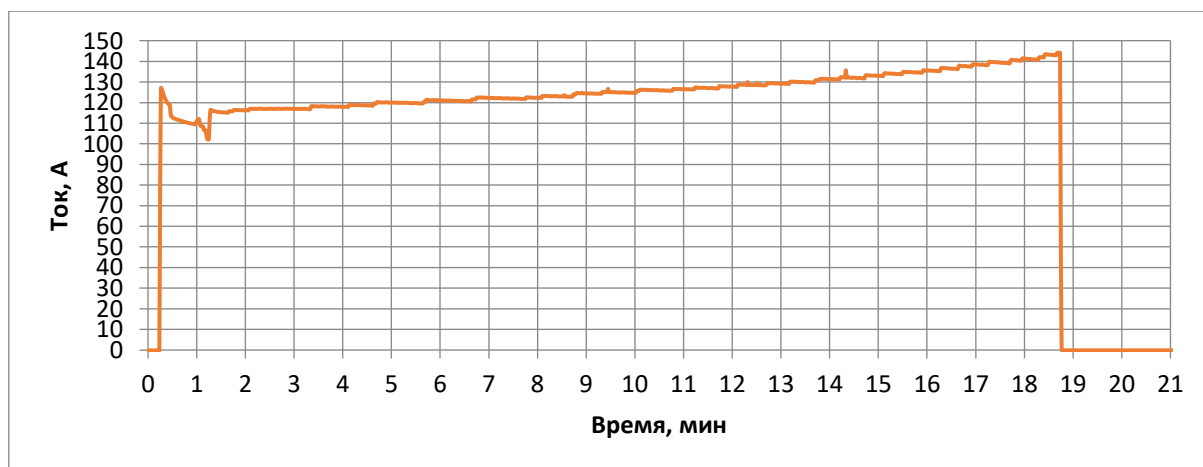
При заряде и разряде стека проточной аккумуляторной батареи происходит ее разогрев из-за выделения потерь мощности на внутреннем сопротивлении, которое, как указывалось выше, значительно. В то же время нагрев электролита свыше 45 °С недопустим из-за возможности его

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.

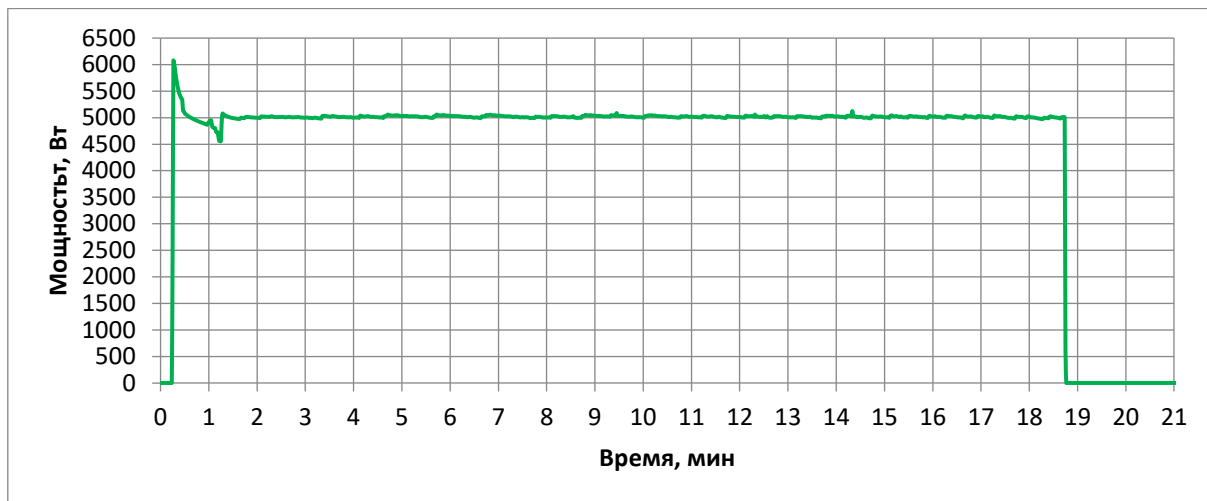
Также были проведены испытания работы ПАКБ при заряде в том же режиме IU и последующем разряде на нагрузку с постоянной потребляемой мощностью. Для реализации последнего условия часть резистивных элементов РБ-315 включалась через блок управления нагрузкой на основе транзисторного ключа. В ходе разряда 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 4.14 (поскольку заряд ПАКБ происходил аналогично, приведена только часть графиков, соответствующая режиму разряда).



а)



б)



в)

Рисунок 4.14. – Результаты испытаний ПАКБ при разряде на нагрузку с постоянной мощностью

Как видно из рисунка 4.14в, 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, как следует из рисунка 4.14а, 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 легко достигнуто увеличением объема используемого электролита.

4.7. Выводы по четвертой главе.

1. Разработано программное обеспечение для системы управления проточной аккумуляторной батареей на основе ПЛК200.

2. 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.

3. 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.

4. Блок управления нагрузкой позволяет реализовать режим разряда ПАКБ с постоянной мощностью.

5. Увеличение температуры электролита в ходе испытаний не превышало 5,7 °С, таким образом, можно не опасаться недопустимого перегрева электролита в ходе работы ПАКБ.

6. 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). Реализация таких устройств на современной компонентной базе силовой электроники не представляет особых затруднений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Житков О.М. и др. Трехфазные статические системы бесперебойного электропитания двигателей переменного тока ответственных систем автоматики // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-6- 2000): Доклады 6 международной научно-практической конференции (2–4 октября 2000 г.), Тюмень: Изд-во Том. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2000. С. 73–74.
5. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Житков О.М. Интерактивные системы бесперебойного электропитания // Наука производству. 1999. №7 (20). С.40–41.
6. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Полонский В.В. и др. Аккумуляторные батареи в системах бесперебойного электропитания. //Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: Сб. трудов НИИ АЭМ, посв. 30-летию института / Под ред. Ю.А. Шурыгина. Томск: Изд-во Том. ун-та,1998. С.197–207.
7. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / Под ред. А. Воронова и И.А. Огурка. М.: Наука, 1984. 344 с.
8. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.

9. Влияния функционализации углеродного войлока в растворе кислот на ASR ванадий-кислотного проточного аккумулятора / Воропай А.Н., Иванов В.В., Кузьмин И.Н. // В сборнике: Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2019. С. 242-244.
10. Воробьев А.Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. М.:Эко-Трендз, 2002. 280 с.
11. Гарганеев А.Г. Общая постановка задачи математического описания режимов аккумуляторных батарей в системах бесперебойного электропитания переменного тока // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: Сб. трудов НИИ АЭМ / Под ред. Ю.А. Шурыгина, Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 13-19.
12. Гарганеев А.Г. Оценка режимов и состояния аккумуляторных батарей в системах бесперебойного электропитания переменного тока // Материалы 16 научнотехнической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», посвященной 50-летию НПЦ «Полус» (19-20 октября 2000 г.). Томск, 2000. С. 24-27.
13. Гарганеев А.Г., Шаталин М.В., Шурыгин Ю.А. Контроль режимов и параметров систем бесперебойного электропитания ответственных потребителей // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: Сб. трудов НИИ АЭМ / Под ред. Ю.А. Шурыгина. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С.3–12. 226
14. Гарганеев А.Г., Шаталин М.В., Шурыгин Ю.А. Построение распределенной среды управления для системы бесперебойного электропитания сетевого вычислительного комплекса // Информатика и системы управления: Сб. научн. трудов под ред. Б.П. Соустина. Красноярск. Вып. 5, 2000. 262 с.

15. Голощапов С.С., Кулик А.И., Яковлев Б.С. К расчету выбросов напряжения в автономной системе электроснабжения с транзисторным регулятором напряжения // Электричество. 1977. № 4. С.76 –78.
16. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М.: Госстандарт, 1998.
17. ГОСТ 24607-88. Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1989.
18. ГОСТ 26416-85. Агрегаты бесперебойного питания на напряжение до 1 кВ. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989.
19. ГОСТ 26567-85. Преобразователи электроэнергии полупроводниковые. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1986.
20. ГОСТ 27699-88. Системы бесперебойного питания приемников переменного тока. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1988.
21. ГОСТ 51514-99 (МЭК 61547-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость светового оборудования общего назначения. Требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2000.
22. ГОСТ Р 51317.6.2-99 (МЭК61000-6-2-99). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2000.
23. ГОСТ Р 51524-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2000. 18 с.
24. ГОСТ Р МЭК 61131-3. Контроллеры программируемые. М.: Стандартиформ, —2016.—230с.
25. Графов Б.М., Укше Е.А. Электрохимические цепи переменного тока. М.: Наука, 1973. 125 с. 224
26. Гулия Н. В. Накопители энергии. – М.: URSS, 2021. – 152 с.

27. Деньщиков К.К., Жук А.З. Гибридный накопитель электроэнергии мегаваттного диапазона // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность. 2016. С. 129-135.
28. Добрусин В.А., Рождественский А.Ю. Выходное напряжение инвертора с синтезированной ШИМ / Электрооборудование автоматизированных установок. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1980. С. 97–99.
29. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. Изд. 2-е, испр. и доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 664 с.
30. Исследование влияния характеристик и конструкции накопителей электрической энергии на работу систем бесперебойного питания / Белов Д.В., Воропай А.Н., Кузьмин И.Н., Лоскутов А.Б. // Электричество. 2020. № 10. С. 4-11.
31. Источники вторичного электропитания / В.А. Головацкий, Г.Н. Гулякович, Ю.И. Конев и др.; Под ред. Ю.И. Конева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990. 280 с.
32. К.К. Деньщиков. Оптимизация взаимодействия наноструктурированных углеродных материалов и электролитов на основе ионных жидкостей для повышения электроэнергетических характеристик суперконденсаторов // Труды Международного форума по нанотехнологиям, (Роснанофорум). – Москва, 2008.
33. Как устроен проточный аккумулятор - подробно // Материалы сайта – 2016. – Режим доступа: <https://bestenergy.com.ua/support/battery/be-210-b>.
34. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
35. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // Chip news. 1999. №1. С. 2–10.
36. Козюков Д.А. Гибридные накопители электроэнергии в ветро-солнечных установках // международный научный журнал «Инновационная наука». 2015. №7. С. 33-35.

37. Козюков Д.А. Исследование фотоэлектрической установки с гибридным накопителем энергии для питания электроприемников фермерских хозяйств // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. 2017. С. 542-543.
38. Коровин Н.В. Топливные элементы. – М.: Химия, 1998.
39. 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.)/
40. 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.)
41. 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.)
42. Лабунцов В.А. Анализ и синтез тиристорных автономных инверторов напряжения: Автореф. дис.... д-ра техн. наук. М., 1973. 60 с. 222
43. Лиепиньш А.В. Синтез регуляторов с автоматической настройкой в момент включения системы: Дис.... канд. техн. наук. Томск, 2001. 151 с.
44. Марьенков С.А. Гибридный накопитель электрической энергии для сетей с распределенной генерацией на основе возобновляемых источников электрической энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 2-3 (56). С. 120-123.
45. Минаев И. Г. Программируемые логические контроллеры: практическое руководство для начинающего инженера. — Ставрополь: АГРУС, — 2009. — 109с.
46. Новые перспективы аккумуляторов // Материалы сайта – 2015. – Режим доступа: <https://technowars.defence.ru/article/2474/>

47. D.I. Panfilov, A.E. ElGebaly, M.G. Astasev, Thyristors Controlled Reactors for Reactive Power Control with Zero Harmonics Content, 17 IEEE Conference, Milan, Italy, 6-9 June 2017.

48. Панфилов Д. И., Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях : практикум на Electronics Workbench: Учеб. пособие для электротехн. и электроэнерг. спец. вузов в 2-х т. / Д. И. Панфилов, В. С. Иванов, И. Н. Чепурин; Под общ. ред. Д. И. Панфилова. — М. : Додэка, 1999.

49. Панфилов Д. И., Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии : производственно-практическое издание / О. Г. Булатов, В. С. Иванов, Д. И. Панфилов. — М. : Радио и связь, 1986.

50. Панфилов Д. И., Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи / Д. И. Панфилов, Ю. Г. Шакарян, М. Г. Асташев, П. А. Рашитов, А. В. Антонов // Электротехника.- 2017. — № 7. — С.78-82.

51. О.С. Попель, А.Б. Тарасенко и Ю.Г. Коломиец. Накопители электрической энергии для их использования в энергоустановках на возобновляемых источниках энергии. – М.: Книжный мир, 2012. – 49 с.

52. Пат. № 5458991 (США). Источник бесперебойного электропитания с автоматическим тестированием / Severinsky A.J. // Опубл.11.10.95.

53. ПВЧ. [Электронный ресурс] — Электрон. Текстовые дан. — Россия: 2021. — Режим доступа: свободный, https://owen.ru/product/preobrazovatel_chastoti_oven_pchv1_i_pchv2 (29.05.2021)

54. Повышение надежности централизованных систем бесперебойного электропитания (обзор типовых схем резервирования) / Интернет-ресурс www.380.ru.

55. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Гибридные накопители электрической энергии: их особенности и применение (обзор) // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 27-44.

56. Портной М.Г., Рабинович Р.С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. М.: Энергия, 1978. 352 с.

57. Проточные аккумуляторы: принцип работы, отличия, тесты, схема // Материалы сайта – 2017. – Режим доступа: <https://akkumulyatoravto.ru/vyborakb/vidy/protochnye-akb.html>.
58. Пугачев Е.В. Автоматизированные системы электрооборудования с аккумуляторными источниками питания: Уч. пособие. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 1999. 198 с.
59. Пугачев Е.В. Аккумуляторные источники питания: модели, характеристики. Кемерово: Изд-во КГТУ, 1999. 248 с. 223
60. Пугачев Е.В., Вавиловский В.И. Динамические характеристики тяговой аккумуляторной батареи как объекта автоматического управления // Электричество. 1984. № 11. С. 59–61.
61. Рашевиц К.К.. Анализ работы тяговых аккумуляторов в режимах нагрузки тиристорными преобразователями электроподвижного состава: Автореф. дис.... канд. тех. наук. Л., 1970. 18 с.
62. Родионов В. Г. Оптимизация структуры генерирующих мощностей. Аккумуляторы – накопители энергии // Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. — М.: ЭНАС, 2010. – С. 68–69.
63. Рождественский А.Ю. Разработка и исследование системы автономный инвертор – асинхронный двигатель с повышенными энергетическими показателями: Дис.... канд. техн. наук. Томск, 1982. 218 с.
64. Руководство по эксплуатации Open Comms Web Card / www.liebert.com.
65. Сергей Романов. Изучаем *Structured Text* МЭК 61131-3. — М.: Мир, — 2020. — 320с.
66. Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. — М.: ЭНАС, 2008.
67. Сошинов А.Г., Угаров Г.Г. Накопители энергии в электроэнергетических системах: Учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2007. – 106 с.

68. Хиноновый проточный аккумулятор: проблемы и перспективы // Материалы сайта – 2014. – Режим доступа: <http://mirnt.ru/energia/hinonovujprotochnyj-akkumuliator-problemy-iperspektivy>
69. Хрипач Н.А., Петриченко Д.А., Чиркин В.Г. К вопросу о моделировании гибридных накопителей энергии // Технические науки на службе созидания и прогресса. 2017. С. 245-248.
70. Хрусталёв Д. А. Аккумуляторы. М: Изумруд, 2003
71. Цветков Г.И. Разработка и исследование однофазных стабилизированных инверторов с синусоидальным выходным напряжением: Дисс.... канд. техн. наук. Томск, 1975. 208 с.
72. Цыркин М.И., Гольдинер А.Я., Тюляков К.А. Режимы работы и определение оптимальной мощности ДЭС в системе «ДЭС-ИБП» / <http://www.electrosystems.ru>.
73. Чернов В.Г. Расчет параметров схемы замещения свинцового аккумулятора с целью определения остаточной емкости / Химические источники тока. Межв. сб. тр. Новочеркасск, 1979. С. 7–12.
74. Чиркин В.Г., Хрипач Н.А., Петриченко Д.А. Обзор структурных схем гибридных накопителей электроэнергии на основе аккумуляторов и суперконденсаторов для применения в энергетических системах // Интеллектуальные технологии и техника в производстве и промышленности. 2017. С. 129-135.
75. Чучалин А.И. Математическое моделирование в электромеханике: Учеб. пособие. Томск. Изд. ТПУ, 1997. 170 с.
76. Шкрадюк И.Э. Тенденции развития возобновляемых источников энергии в России и мире / И.Э. Шкрадюк. – М.: WWF России, 2010. – 88 с.
77. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 564 с.

78. Щелочной аккумулятор для возобновляемых источников энергии // Материалы сайта – 2015. – Режим доступа: <http://altenergiya.ru/accumulator/shhelochnoj-akkumulyator-dlya-vie.html>

Патенты:

79. Патент на полезную модель РФ № 219617 U1. «Устройство для снабжения средствами жизнеобеспечения в условиях аварийной ситуации в подземном сооружении». Правообладатель: Федеральное казенное учреждение «Воинская часть 25776». Авторы: Борулев А.Д., Паршин С.М., Землянко Е.Л., Кузьмин И.Н. Дата заявки: 18.04.2023. заявитель и правообладатель Федеральное казенное учреждение «Воинская часть 25776» (RU).

80. 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).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ДАТЧИКИ, КОНТРОЛЛЕРЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОТОЧНЫМ АККУМУЛЯТОРОМ

«Овен» ПЛК200

На рисунке 1 представлена система с ПЛК.

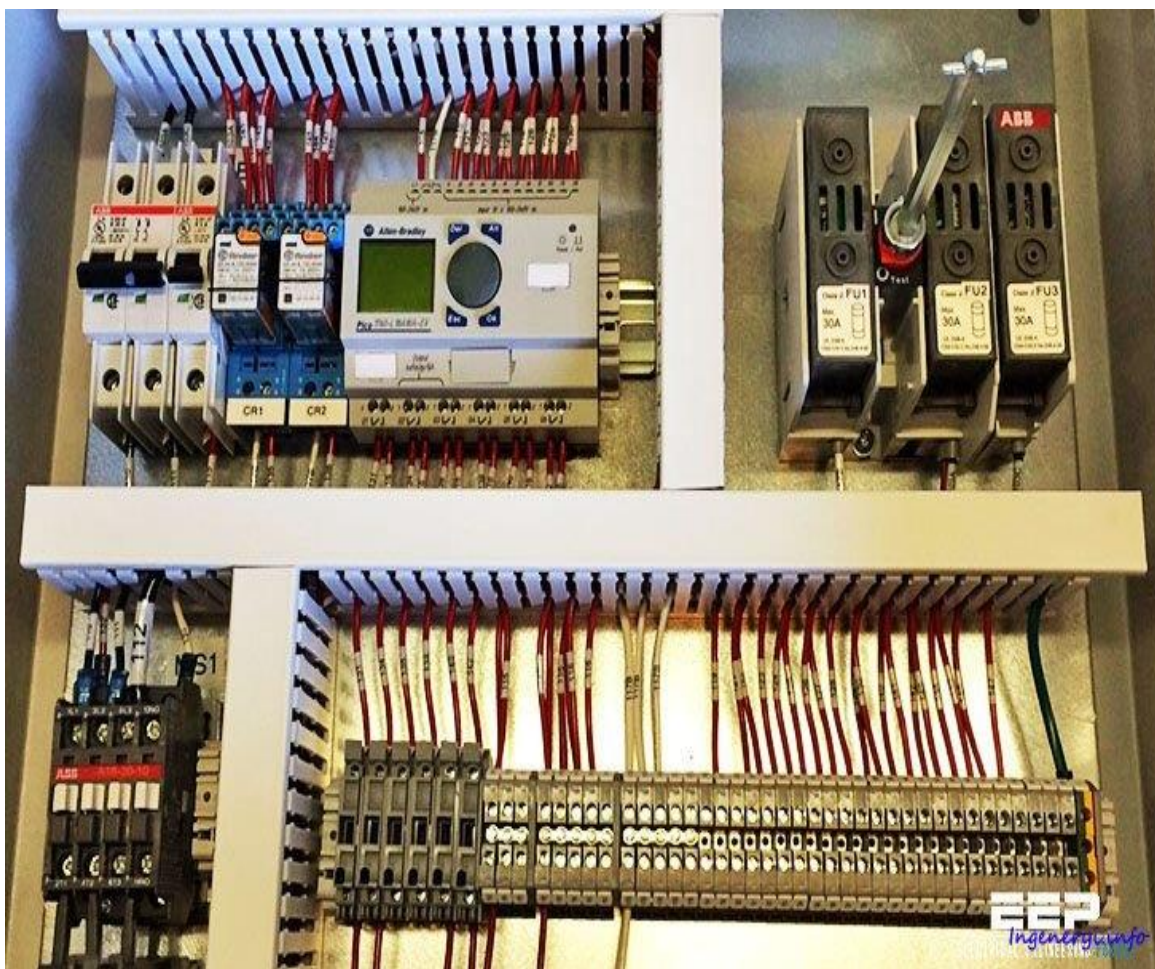


Рис.1. Система с ПЛК

Одним из главных преимуществ ПЛК является их универсальность. ПЛК можно запрограммировать в цифровом виде, что позволяет адаптировать устройство под нужды конкретного технологического процесса. В качестве самого частого использования ПЛК обычно выступает управление последовательными процессами, где для определения состояния объекта используются аналоговые или дискретные входы и выходы [5]. На основе полученных данных программа определяет дальнейшее управляющее воздействие.

ПЛК200 это контроллер последнего поколения для малых и средних систем автоматизации произведенный фирмой «Овен». На рисунке 2 представлен ПЛК200 фирмы «Овен»



Рис.2. ПЛК200 фирмы «Овен»

ПЛК200 оборудован аналоговыми и дискретными входами и выходами, количество которых варьируется в зависимости от версии ПЛК. На рисунке 2, представленном выше, изображен ПЛК200-01, то есть первой версии. В данной версии ПЛК200 присутствует 8 дискретных входов и 14 дискретных выходов, аналоговые входы и выходы отсутствуют. Также все версии данного ПЛК оборудованы двумя портами типа *Ethernet*, поддерживают стандарт связи *RS-485*, имеют один разъем для осуществления заряда батареи и один порт типа *USB*. Слот для подключения *SD* накопителя емкостью до 512гб, также присутствует на всех версиях данного ПЛК. На рисунке 3 изображен открытый ПЛК200, на котором наглядно представлен интерфейс контроллера [5].



Рис.3. Открытый ПЛК200

Данный ПЛК обладает рядом технических характеристик, которые гарантируют высокую производительность и комфорт при работе с данным контроллером. Высокую производительность обеспечивает процессор *ARM® Cortex-A8* с частотой 800 МГц и достаточно большой объём памяти 512Мбайт постоянного запоминающего устройства и 256Мбайт оперативной памяти. Также быстрдействию сопутствует поддержка быстрых входов и выходов до 95 кГц [5]. ПЛК оснащен удобной системой укладки кабеля, возможностью крепления на стену или *DIN*-рейку и съёмными клемниками с невыпадающими винтами, что обеспечивает комфорт при проведении монтажных работ. Программирование ПЛК200 производится в среде разработки *CODESYS V3.5 SP14 Patch 3*.

CODESYS

CODESYS – это интегрированная среда разработки приложений для программируемых контроллеров. *CODESYS* поддерживает все 5 языков программирования стандарта МЭК 61131-3

(LD, FBD, IL, ST, SFC) и включает дополнительный язык CFC (расширение FBD со свободным порядком выполнения блоков) [1]. Также в состав CODESYS входит редактор визуализации, конфигураторы протоколов обмена и средства отладки. На рисунке 4 изображен интерфейс редактора визуализации среды разработки CODESYS.

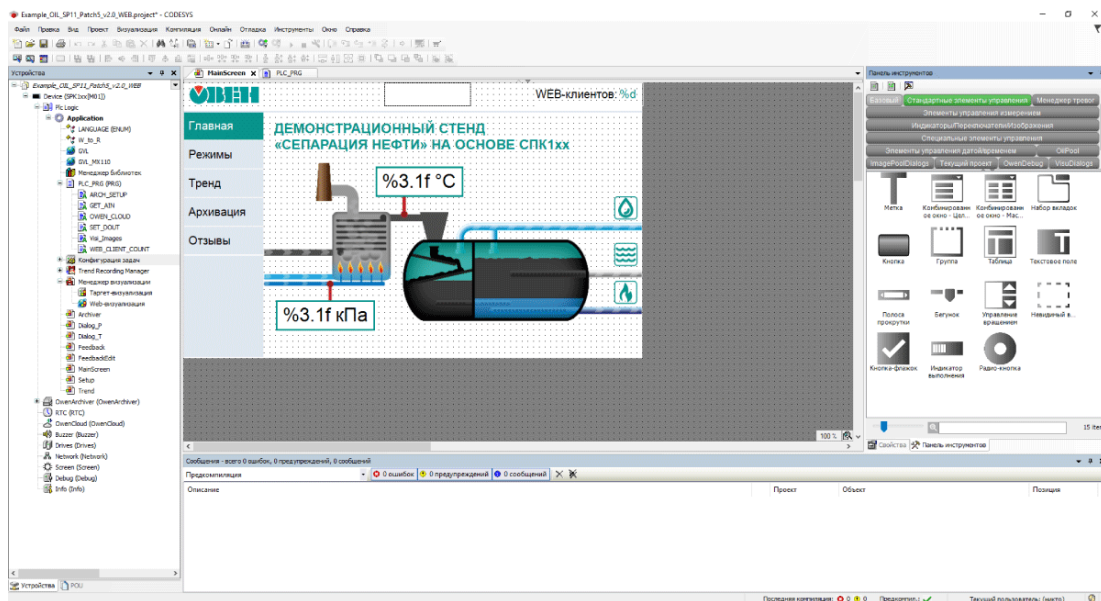


Рис.4. Редактор визуализации среды разработки CODESYS (пример)

Главным плюсом среды разработки CODESYS является относительная простота интерфейса благодаря чему процесс программирования ПЛК более комфортным. Основным языком программирования был выбран язык ST, потому что данный язык позволяет осуществлять более сложные операции чем другие языки протокола МЭК 61131-3. Сам же язык представляет текстовый редактор высокого уровня. Сам язык дает возможность описывать сложные операции компактным и более приятным для восприятия текстом. Язык содержит множество простых конструкций, позволяющих присваивать переменные, подключать и использовать множество библиотек и функциональных блоков.

Среда разработки CODESYS предоставляет разработчику большое количество возможностей для реализации программ различного назначения. Эргономичный интерфейс позволяет быстро ориентироваться даже начинающему программисту. Программисту доступен целый спектр базовых возможностей. Например, можно создать целый класс глобальных переменных, где будут содержаться все переменные, используемые в работе. Также программист доступны данные о состоянии всех портов, возможность подключиться к облачному хранилищу OwenCloud и множество других функций из обширного списка среды разработки CODESYS [4].

Измерительные устройства

В системе управления используются различные измерительные устройства:

ХКС-У25-РNP – это бесконтактный датчик определяющий уровень жидкости. Данные датчики располагаются на внешней стенке емкости и определяют уровень жидкости внутри. Датчик обладает достаточно большой точностью и определяет уровень жидкости через металл или другие материалы толщиной до 12мм. Если пред датчиком находится жидкость, то он сигнализирует об этом постоянно горящим светодиодным индикатором. Если же уровень жидкости понижается, то он проинформирует об этом в виде логического сигнала. На рисунке номер 5 изображен датчик *ХКС-У25-РNP*.



Рис.5. Датчик *ХКС-У25-РNP*

Корунд-ДИ-001м – это датчики, предназначенные для работы в системах автоматического контроля. Датчик проводит измерения избыточного давления и обеспечивает непрерывное преобразование в унифицированный электрический выходной сигнал постоянного тока. Датчик обладает хорошими показателями точности, где погрешность не превышает 0,5% [7]. Также датчик обладает другими техническими характеристиками:

- Диапазон измеряемого давления: 0...+100кПа
- Выходной сигнал: 4...20мА
- Диапазон рабочих температур внешней среды: -10...+70°C
- Диапазон допустимых температур измеряемой среды: -40...+135°C

На рисунке номер 6 изображен датчик Корунд-ДИ-001м.



Рис. 6. Датчик Корунд-ДИ-001м

YF-S201C – это датчик расхода жидкости. Работа датчика осуществляется благодаря магнитному ротору, установленному внутри корпуса. Скорость вращения ротора зависит от расхода жидкости. Чем быстрее вращается ротор, тем выше расход.

Технические характеристики:

- Минимальное номинальное рабочее напряжение постоянного тока: 5 В-24 В
- Максимальный рабочий ток: 15 мА (5 В постоянного тока)
- Диапазон рабочего напряжения: 5 ~ 18 В постоянного тока
- Диапазон рабочих температур: ≤ 80 °С
- Диапазон рабочей влажности: от 35% до 90% относительной влажности
- Температура окружающей среды: -25 ~ +80 °С
- Влажность окружающей среды: 25% ~ 95% относительной влажности

На рисунке 7 изображен датчик *YF-S201C*.



Рис. 7. Датчик *YF-S201C*

Датчик тока *LF 306-S*. Датчик предназначен для преобразования токов в пропорциональный выходной ток.

Технические характеристики:

- Номинальный входной ток: 300А
- Диапазон преобразования: 0...500А
- Номинальный аналоговый выходной ток: 150мА
- Точность преобразования: около 0,6%
- Рабочая температура: -25...+70°C

На рисунке 8 изображен датчик тока *LF 306-S*.



Рис. 8. датчик тока *LF 306-S*

Датчик напряжения *LV 25-P*. Данный датчик построен по принципу преобразования входного тока, пропорциональному приложенному напряжению в пропорциональный выходной ток.

Технические характеристики:

- Номинальный входной ток: 10мА
- Диапазон входного напряжения: 10...500В
- Номинальный аналоговый выходной ток: 25мА
- Точность преобразования: около 0,8%
- Рабочая температура: -25...+70°C

На рисунке 9 изображен Датчик напряжения *LV 25-P*.

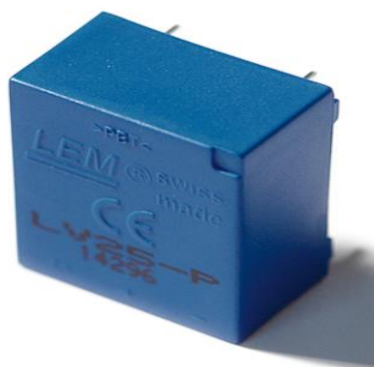


Рис. 9. Датчик напряжения *LV 25-P*



Рис. 11. Модуль MB110



Рис. 12. Модуль МУ110

Преобразователь частот, также является продуктом компании «Овен». Частотные преобразователи могут быть использованы для управления приводами на базе асинхронных двигателей в промышленности и ЖКХ [3].

Основные параметры:

- Питание 1×220 В (0,18...2,2 кВт) и 3×380 В (0,37...22 кВт);
- Выходная частота до 400 Гц;
- Диапазон регулирования до 1:1000;
- Точность поддержания скорости до 0,1% от фактической;
- Точность поддержания момента до 0,5% от фактического;

Первичное техническое решение

Первичное техническое решение представляет собой систему управления проточной аккумуляторной батареей на основе *L-CARD E-502* и *LabVIEW*. Взаимодействие пользователя с системой осуществлялось при помощи персонального компьютера. В системе разработки *LabVIEW* разрабатывалось программное обеспечение и интерфейс для системы управления. На рисунке 13 изображен интерфейс системы управления, созданный в среде разработки *LabVIEW*.

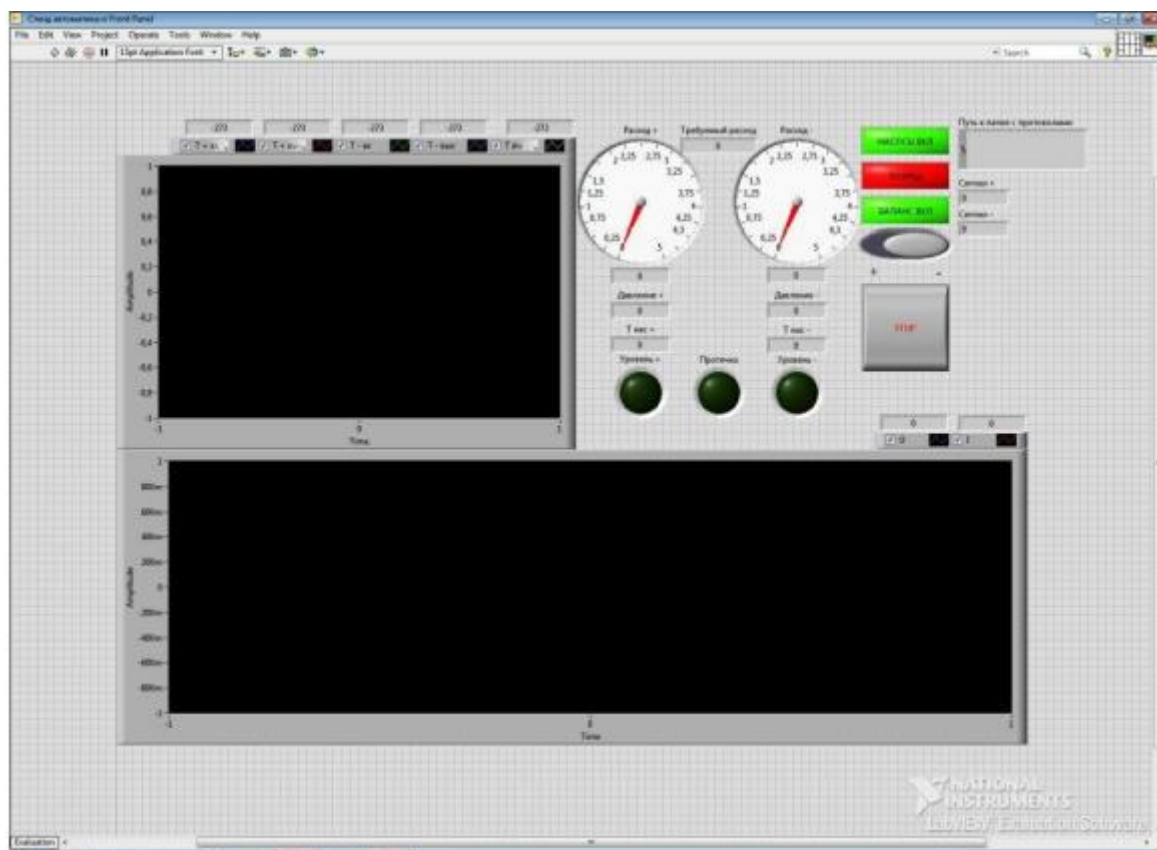


Рис. 13. Интерфейс системы управления

Программное обеспечение управления проточной аккумуляторной батареей предназначено для сбора и обработки данных со всех установленных датчиков, реализации логики функционирования стенда и визуализации измеренных и расчетных значений на экране монитора в реальном времени в виде графиков и диаграмм.

Сбор всех данных происходил при помощи плат ввода и вывода сигналов *L-CARD E-502*.

Измерительные устройства взаимодействующие с системой управления:

- датчики давления электролита (2 шт.),
- датчики уровня электролита (2 шт.),
- датчики расхода электролита (2 шт.),

- датчики температуры электролита (4 шт.),
- датчик температуры стека (1 шт.),
- датчики температуры насосов (1 шт.),
- балансирующий химический насос (1 шт.),

На индикаторах и графиках основного окна программы отображалась следующая информация:

- напряжение на ПАКБ, В,
- ток заряда/разряда, А,
- расход электролита в обоих контурах ПАКБ, м³/час,
- давление в обоих контурах на входе в ПАКБ, атм.,
- температура электролита на входе и выходе ПАКБ в обоих контурах, °С,
- температура стека, °С,
- температура насосов, °С,
- режим работы «заряд/разряд»,
- уровень электролита в баках,
- индикация протечки электролита.

Все данные автоматически протоколировались с циклом 1 раз в секунду.

Также присутствовала система, которая в случае аварийной ситуации сигнализировала об этом. Например, при резком повышении скорости потока и резком уменьшении давления система выдавала ошибку «АВАРИЯ ГИДРОСИСТЕМЫ», для нейтрализации которой требовалось немедленное отключение насосов.

На рисунках 14, 15, 16 и 17 изображены блок-схема программного обеспечения системы управления проточной аккумуляторной батареей.

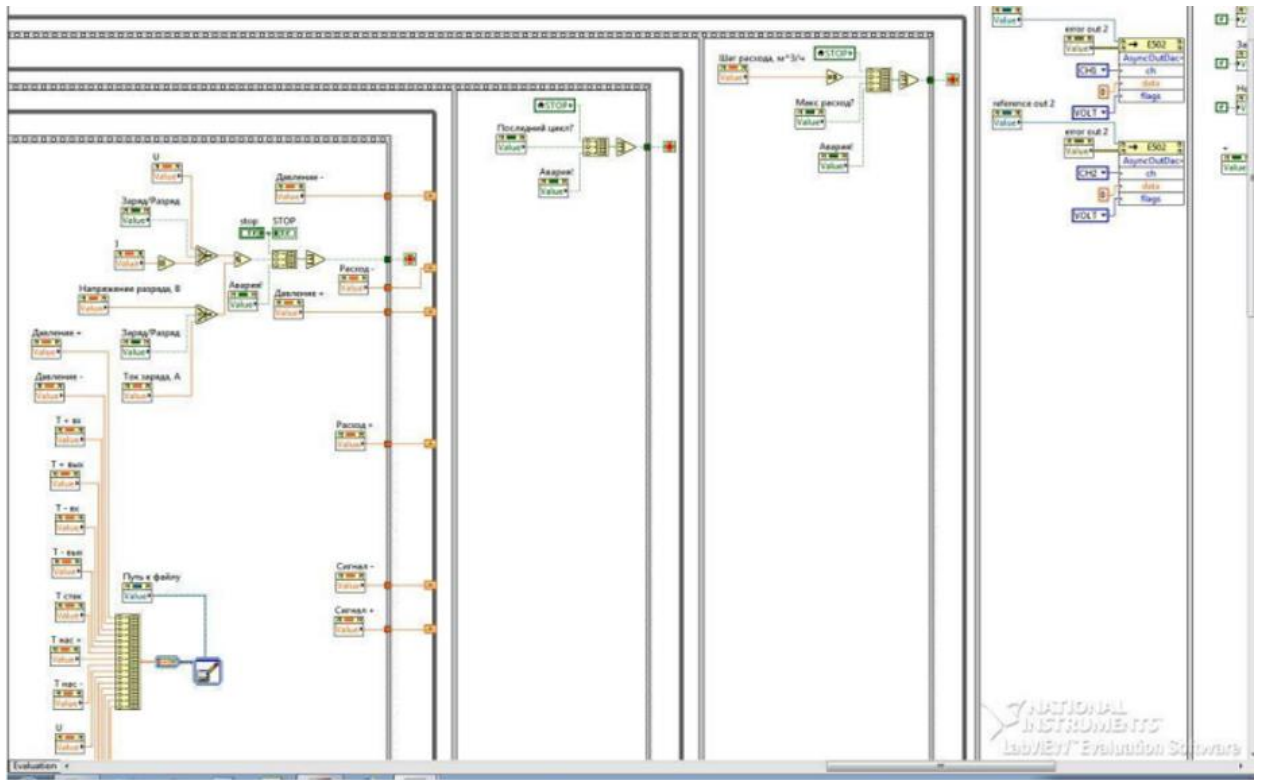


Рис. 14. Блок-схема программного обеспечения системы управления проточной аккумуляторной батареей

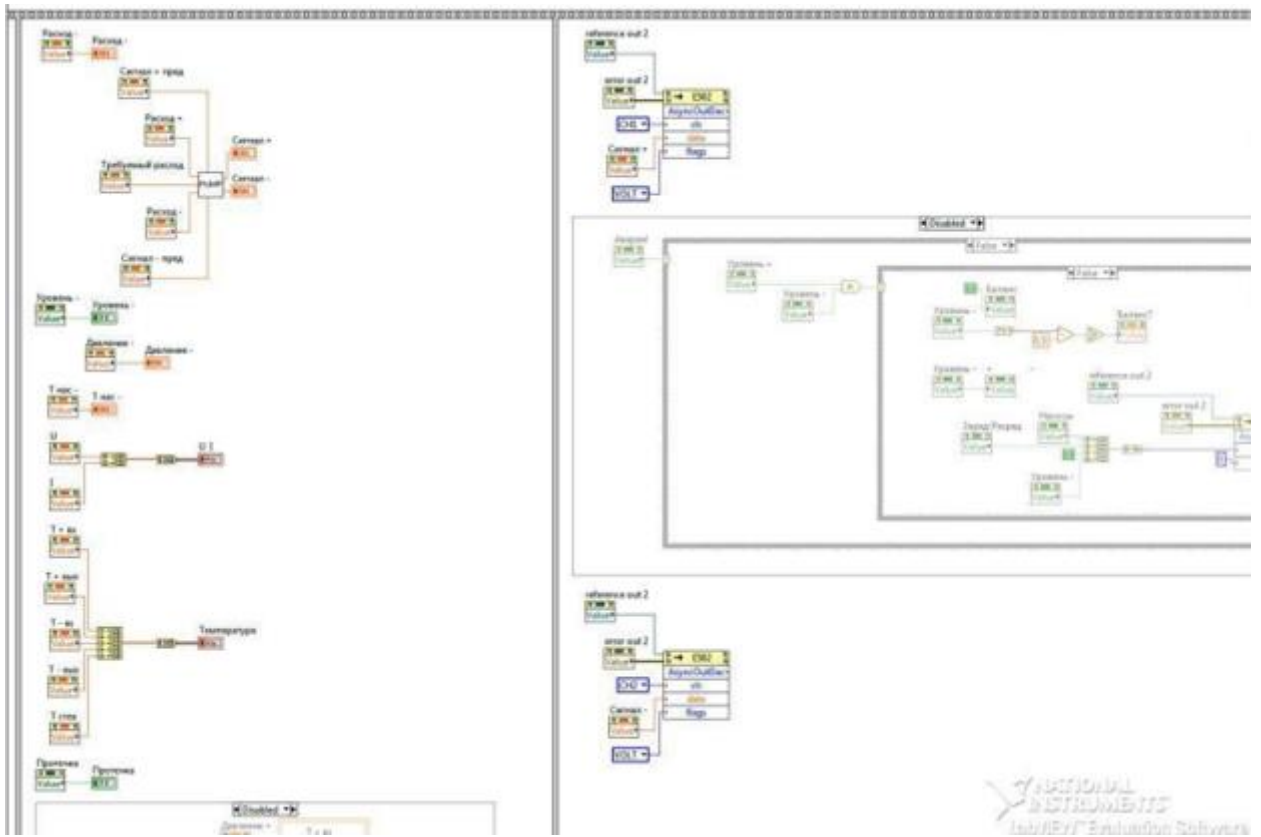


Рис. 15. Блок-схема программного обеспечения системы управления проточной аккумуляторной батареей

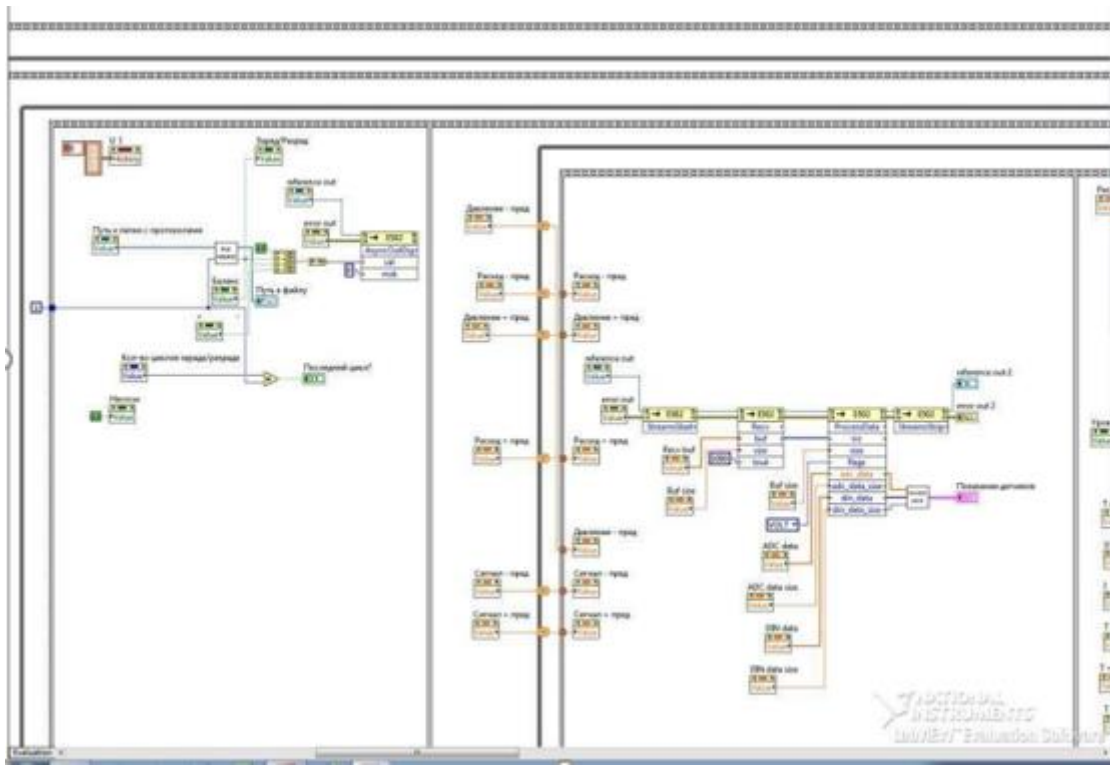


Рис. 16. Блок-схема программного обеспечения системы управления проточной аккумуляторной батареей

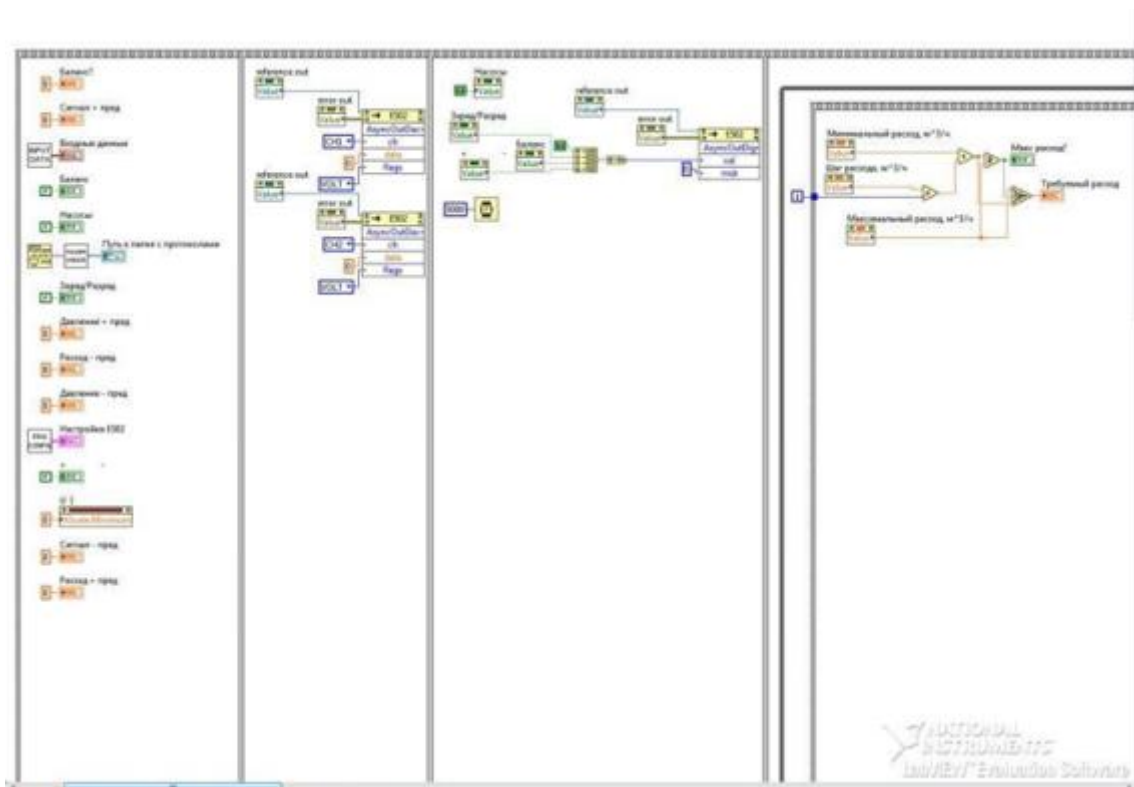


Рис. 17. Блок-схема программного обеспечения системы управления проточной аккумуляторной батареей

Блок-схема программного обеспечения системы управления проточной аккумуляторной батареей представлена не в полном объеме в силу того, что полное представление данной блок-схемы занимает слишком большое пространство. В полном объеме блок-схема будет представлена далее (приложение 1).

Главным плюсом системы управления на основе *L-CARD E-502* и *LabVIEW* является то, что она полностью функционирует. Все системы работают исправно и стабильно. Из минусов стоит отметить, что данная система не является автономной, ее программирование сложный и долгий процесс, а также устройство считывания и программа управления находятся на разных устройствах.

Система управления на основе ПЛК200 полностью подходит под нужды автоматизации, исключая недочеты, которые были допущены в системе на основе *L-CARD E-502* и *LabVIEW*. ПЛК200 управляет всей системой самостоятельно, по сути, объединяя в себе устройство считывания, программное средство и компьютер, что существенно облегчает работу с системой. Также ПЛК200 полезен тем, что не нужно разрабатывать аппаратное обеспечение системы, что повышает скорость разработки.

Реализация системы управления на основе ПЛК200

Система управления проточной аккумуляторной батареей на основе ПЛК200 реализована в среде разработки *CODESYS*. Разработаны графический интерфейс пользователя и основные функции мониторинга, сигнализации и управления. Вся система разработана на основе технических средств, представленных выше.

Дополнительные модули

Для начала стоит описать подключение дополнительных модулей подключение которых было необходимо в рамках данной системы. Подключение модулей происходит через порты *RS-485* по протоколу *Modbus*.

Перед тем как работать с модулями их нужно сконфигурировать. Программу «Конфигуратор» можно скачать с сайта фирмы «Овен», на том же сайте есть подробные мануалы по конфигурации. Или можно скачать готовые шаблоны с того же сайта, далее нужно установить шаблон и настроить. Для настройки шаблона требуется выбрать адрес модуля и привязать переменные к нужным каналам. Таким образом подключены: два модуля *МВ110*, модуль *МУ110*, а также два преобразователь частот.

Графический интерфейс пользователя

Разработка интерфейса самая простая из выполненных задач. Поскольку в среде разработки *CODESYS* предусмотрена возможность визуализации.

Для создания интерфейса во вкладке визуализации есть окно элементов, где содержатся все нужные разработчику детали интерфейса: кнопки, окна отображения информации и так далее. Выбранный элемент нужно просто перетащить на окно визуализации и масштабировать его. На рисунке 18 изображен интерфейс системы управления на основе ПЛК200.

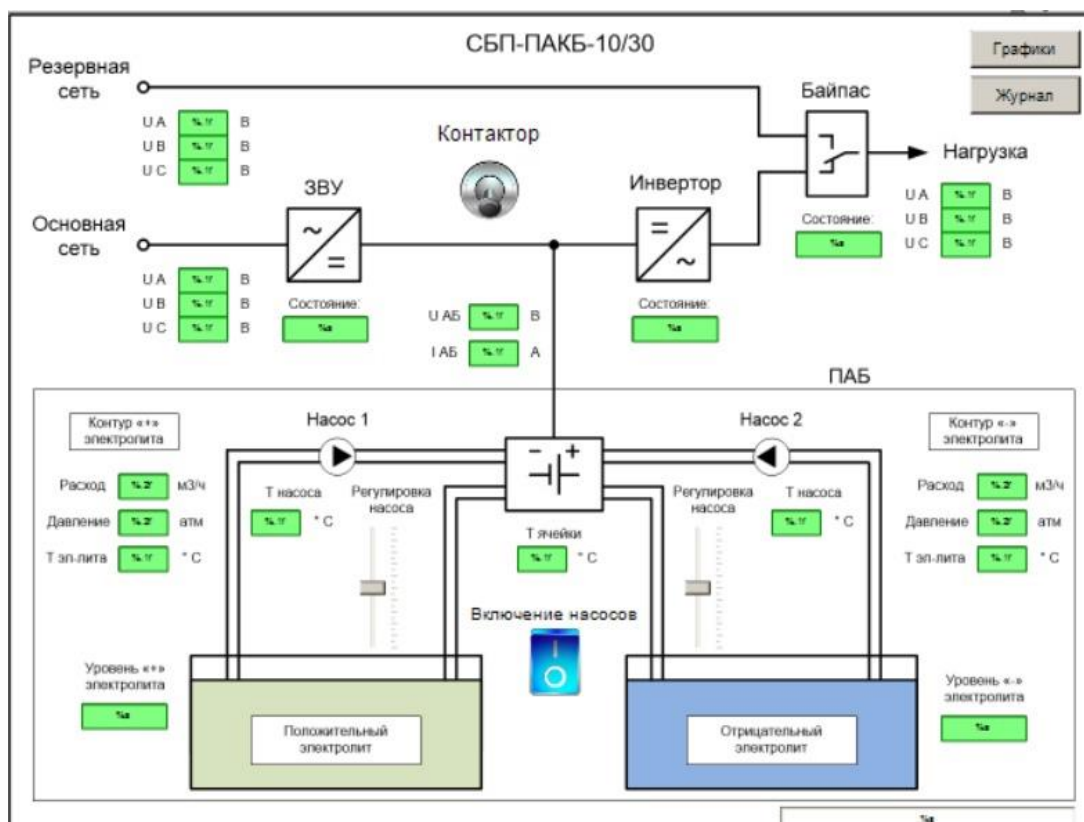


Рис. 18. интерфейс системы управления на основе ПЛК200

Далее остается настроить графический интерфейс в соответствии с необходимыми требованиями и привязать к элементам значения для выдачи управляющего воздействия или отображения информации. Например, текстовому окну нужно присвоить переменную, из которой будет выводиться информация.

На интерфейсе присутствуют кнопки «журнал» и «графики». При нажатии на кнопку «журнал» открывается интерфейс, который отображает все события, происходящие во время

работы батареи (рис. 19). Взаимодействие с кнопкой «графики», пользователь перейдет на интерфейс, отображающий динамическое изменения тока и напряжения аккумуляторной батареи (рис. 20).

Журнал событий

Дата и время	События
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	

Рис. 19. Журнал событий

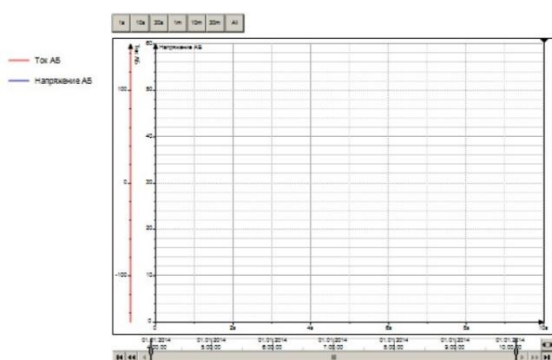


Рис. 20. Графики тока и напряжения

Подключение портов

Отдельно стоит сказать о подключении портов. В среде разработки *CODESYS* все порты изначально имеют свои переменные и для получения информации разработчику требуется прировнять свои переменные к переменным портов (рис. 21).

```
(* Чтение дискретных входов ПЛК *)
GlobalVars.Sign_Fluid_Level[0] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi01;
GlobalVars.Sign_Fluid_Level[1] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi02;
GlobalVars.Sign_Fluid_Out[0] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi03;
GlobalVars.Sign_Fluid_Out[1] := TargetVars.stLeftSide.xFastDi04;
```

Рис. 21. Код подключение портов

Сигнализация

В систему сигнализации входят: сигнализация о протечке и понижении уровня положительно и отрицательно заряженных электролитов.

Сигнализация о протечке электролита происходит при помощи поддона размещенном под баком с электролитом. В данном поддоне размещены два контакта. Когда происходит протечка данные контакты замыкаются и на дискретный вход поступает сигнал о изменении состояния. Программа определяет в баке с каким электролитом произошла протечка (рис. 22). После сигнал поступает на интерфейс, где загорается лампочка утечки положительного или отрицательного электролита.

```
// Утечка электролита из бака
FOR k := 0 TO 1 DO
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k], Buf_Sign_Fluid_Out[k]) = 1 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Утечка положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Утечка отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Out[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k], Buf_Sign_Fluid_Out[k]) = 2 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Нет утечки положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Нет утечки отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Out[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Out[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
END_FOR
```

Рис. 22. Код сигнализации утечки электролита

Сигнализация о понижении уровня электролита работает следующим образом: на внешней стенке бака с электролитом установлена датчик *XKC-Y25-PNP*, когда датчик регистрирует понижение уровня электролита, на дискретный вход поступает сигнал о изменении состояния, далее программа определяет в каком баке понизился уровень (рис. 23). После сигнал поступает на интерфейс, где загорается индикатор понижения уровня положительного или отрицательного электролита.

```
// Снижение уровня электролита
FOR k := 0 TO 1 DO
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k], Buf_Sign_Fluid_Level[k]) = 1 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Снижение уровня положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Снижение уровня отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Level[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
  IF IsChange(GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k], Buf_Sign_Fluid_Level[k]) = 2 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    IF k = 0 THEN
      ArrTable[TableIndex].Event := "Нормальный уровень положительного электролита";
    ELSE ArrTable[TableIndex].Event := "Нормальный уровень отрицательного электролита";
    END_IF
    Buf_Sign_Fluid_Level[k] := GlobalVars.Sign_Fluid_Level[k];
    TableIndex := TableIndex + 1;
  END_IF
END_FOR
```

Рис. 23. Код сигнализации понижения уровня электролита.

Управление

Система управления включает в себя следующие функции:

4. Функция включения и выключения насосов;
5. Функция управления режимами работы насосов;
6. Функция переключения режимов работы батареи:
 - a. Заряд;
 - b. Разряд.

Включение и выключение насосов происходит при нажатии на кнопку на интерфейсе. Дискретные входы передают электрический сигнал на устройства и насосы включаются. Программа обрабатывает данное действие и передает статус в журнал (рис. 24).

```
// Включение/отключение насосов
IF IsChange(GlobalVars.Pump_IO, Buf_Pump_IO) = 1 THEN
  ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
  ArrTable[TableIndex].Event := "Включены насосы";
  Buf_Pump_IO := GlobalVars.Pump_IO;
  TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF IsChange(GlobalVars.Pump_IO, Buf_Pump_IO) = 2 THEN
  ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
  ArrTable[TableIndex].Event := "Отключены насосы";
  Buf_Pump_IO := GlobalVars.Pump_IO;
  TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
```

Рис. 24. Код функции включения и отключения насосов

Изменение режимов работы насосов происходит при взаимодействии с бегунками, расположенными на интерфейсе. При изменении положения бегунка через аналоговый выход подается сигнал на преобразователь частот, который преобразовывает данный электрический сигнал и передает его на насосы для изменения мощности их работы.

Включение и выключение контактора происходит за счет переключения тумблера на интерфейсе программы. При переключении тумблера меняется состояние работы батареи с заряда на разряд и наоборот. Все действие анализируется программой и заносится в журнал (рис. 25).

```

// Включение/отключение контактора
IF IsChange(GlobalVars.Kont_IO, Buf_Kont_IO) = 1 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    ArrTable[TableIndex].Event := "Включен контактор (батарея подключена к ЗВУ)";
    Buf_Kont_IO := GlobalVars.Kont_IO;
    TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF IsChange(GlobalVars.Kont_IO, Buf_Kont_IO) = 2 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    ArrTable[TableIndex].Event := "Отключен контактор (батарея подключена к нагрузке)";
    Buf_Kont_IO := GlobalVars.Kont_IO;
    TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF TableIndex > 100 THEN
    TableIndex := 0;
END_IF

```

Рис. 25. Код функции переключения режимов работы батареи

Мониторинг

Система мониторинга представляет собой совокупность измерительных устройств, которые предоставляют контроллеру следующую информацию:

- напряжение на выводах проточной аккумуляторной батареи;
- ток проточной аккумуляторной батареи;
- расход положительного и отрицательного электролита;
- давление в контурах прокачки положительного и отрицательного электролита;
- температуры положительного и отрицательного электролита;
- температура ячеек ПАКБ.

Кроме того, предусмотрена сигнализация о ненормальных и аварийных режимах работы:

- повышение температуры положительного и отрицательного электролита, ячеек проточной аккумуляторной батареи;
- выход напряжения проточной аккумуляторной батареи за границы диапазона допустимых значений;
- выход расхода положительного и отрицательного электролита за границы диапазона допустимых значений;
- выход давления в контурах прокачки положительного и отрицательного электролита за границы диапазона допустимых значений.

Все измерительные устройства подключены схожим образом. Измерительное устройство подключается к аналоговым входам модулей MB110, на которые периодически передает

электрический сигнал с информацией о каком-либо измерении. Программа обрабатывает поступивший сигнал и проверяет его на соответствие заданным нормам. Далее программа заносит состояния измерений в журнал (рис. 26).

```
// Температура АБ
IF IsChange(GlobalVars.Warn_Temp_Bat, Buf_Warn_Temp_Bat) = 1 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    ArrTable[TableIndex].Event := "Температура проточной ячейки выше допустимой";
    Buf_Warn_Temp_Bat := GlobalVars.Warn_Temp_Bat;
    TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
IF IsChange(GlobalVars.Warn_Temp_Bat, Buf_Warn_Temp_Bat) = 2 THEN
    ArrTable[TableIndex].DateAndTime := TIME_TO_TABLE(CurrentDateAndTime);
    ArrTable[TableIndex].Event := "Температура проточной ячейки в норме";
    Buf_Warn_Temp_Bat := GlobalVars.Warn_Temp_Bat;
    TableIndex := TableIndex + 1;
END_IF
```

Рис. 26. Пример кода обработки сигнала с измерительного устройства

Также разработан документ «Работа с ПЛК на стенде» в котором пошагово описано взаимодействие с системой управления (приложение 2).

Заключение

Все поставленные задачи успешно выполнены. Изучены все используемые технические средства и устройства. Изучено и проанализировано первичное техническое решение. Разработано программное обеспечение для системы управления проточной аккумуляторной батареей на основе ПЛК200.

Система управления проточной аккумуляторной батареей на основе ПЛК200 полностью функционирует, все системы работают исправно в стандартном режиме. Данная система сохранила в себе все положительные стороны первичного технического решения, а также позволила исключить все недоработки.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Балансировка стеков проточной ванадиевой батареи с использованием принудительного ослабления потока для увеличения глубины разряда

В режиме реального времени даже одни и те же батареи проточных батарей могут иметь разные гидродинамические сопротивления, например, в течение длительной эксплуатации, вследствие деградации электродов и мембран, что приводит к дисбалансу проходящего через них потока электролита и неравномерности операция. Стек с наименьшим гидродинамическим сопротивлением принимает на себя больший объем электролитов, что приводит к худшей работе других стеков в системе. В то же время мощность системы с последовательно соединенными батареями ограничивается самым слабым элементом, что приводит к ухудшению ее характеристик. Существует также большая проблема шунтирующего сопротивления в полностью ванадиевых окислительно-восстановительных батареях. Это заставило исследователей искать пути повышения удельного сопротивления в каналах проточных ячеек. Например, авторы работы предложили использовать длинные проточные каналы для увеличения сопротивления. Это увеличивает гидродинамическое сопротивление, но и уменьшает шунтирующие токи.

Изучаются различные подходы к повышению эффективности и плотности энергии ванадиевых окислительно-восстановительных проточных батарей. Например, исследования по разработке новых электродных материалов с использованием углеродных наноструктур, таких как нанотрубки, графен и ультрадисперсный углерод, или осажденных каталитических частиц оксидов металлов, таких как марганец, никель и висмут, представляют большой интерес. Большое количество исследований посвящено разработке новых электролитов и мембран. Моделирование вычислительной гидродинамики (CFD) является эффективным способом тестирования различных конструкций полей потока и проверки электрохимических характеристик результатов.

Другие подходы основаны на повышении эффективности за счет оптимальной стратегии управления батареями. В отличие от разработки новых материалов, которая является пассивным способом улучшения характеристик аккумуляторов, совершенствование алгоритмов и методов управления является активным методом. Помимо основных элементов ванадиевой батареи могут быть и вспомогательные, например система управления зарядом батареи, система балансировки батареи или система преобразования энергии. Алгоритм управления производительностью насоса с целью повышения эффективности проточной батареи был предложен, где скорость потока электролита меняется на разных стадиях процесса заряда и разряда. Этот новый подход к

управлению повысил эффективность системы и кулоновский КПД на 3,34% и 3,84% соответственно по сравнению с постоянным расходом. Предложенный метод решает серьезную проблему в приложениях проточных аккумуляторов, а именно преждевременное отключение аккумулятора при низком уровне заряда, что приводит к неполному использованию энергии электролита и уменьшению глубины разряда (DoD). Другой подход с использованием пульсирующего потока, при котором насосы работают в прерывистом режиме. Нагрузка на помпу была снижена почти на 50% при незначительном уменьшении DoD батареи. Общая эффективность системы выросла более чем на 80%. Но такой подход снижает срок службы насосов, а затраты на обслуживание насосов увеличиваются до 14% от затрат на обслуживание всей системы .

Если необходимо увеличить DoD и в то же время адаптироваться к изменяющейся нагрузке, то, расход должен увеличиваться при увеличении нагрузки. Это немного снижает эффективность, но при этом практически не снижает DoD батареи. Результаты были подтверждены с использованием полностью ванадиевой проточной батареи мощностью 5 кВт/5 кВтч. Однако в представленных исследованиях системы содержат только одну батарею и не учитывают проблему, возникающую в системе с двумя и более батутами, а именно дисбаланс потоков электролита в различных цепях. Данную проблему невозможно решить методами управления насосами, поскольку это приведет к чрезмерной нагрузке на насосы и один из контуров будет работать с избыточной емкостью электролита, что приведет к снижению общего КПД системы.

В данной работе рассматривается задача балансировки потоков аккумуляторных батарей, соединенных параллельно, по объемному расходу электролита. Исследован прототип системы бесперебойного питания (ИБП) на основе двух стопок полностью ванадиевых проточных окислительно-восстановительных батарей, электрически соединенных последовательно и параллельно в электролитах. Электролит закачивается двумя центробежными насосами, по одному на каждый контур (контур с положительным электролитом и контур с отрицательным электролитом). Целью данной статьи является демонстрация того, что из-за различия гидродинамических параметров батареи электролит протекает по пакетам по-разному, а напряжение, наведенное на батарею при меньшем расходе электролита, уменьшается. Это приводит к неполному использованию энергии электролита и приводит к снижению эффективности системы и DoD. Этот эффект можно исправить за счет уменьшения расхода через ячейку с малым гидродинамическим сопротивлением с помощью шаровых кранов (7), по схеме на рисунке 1 .

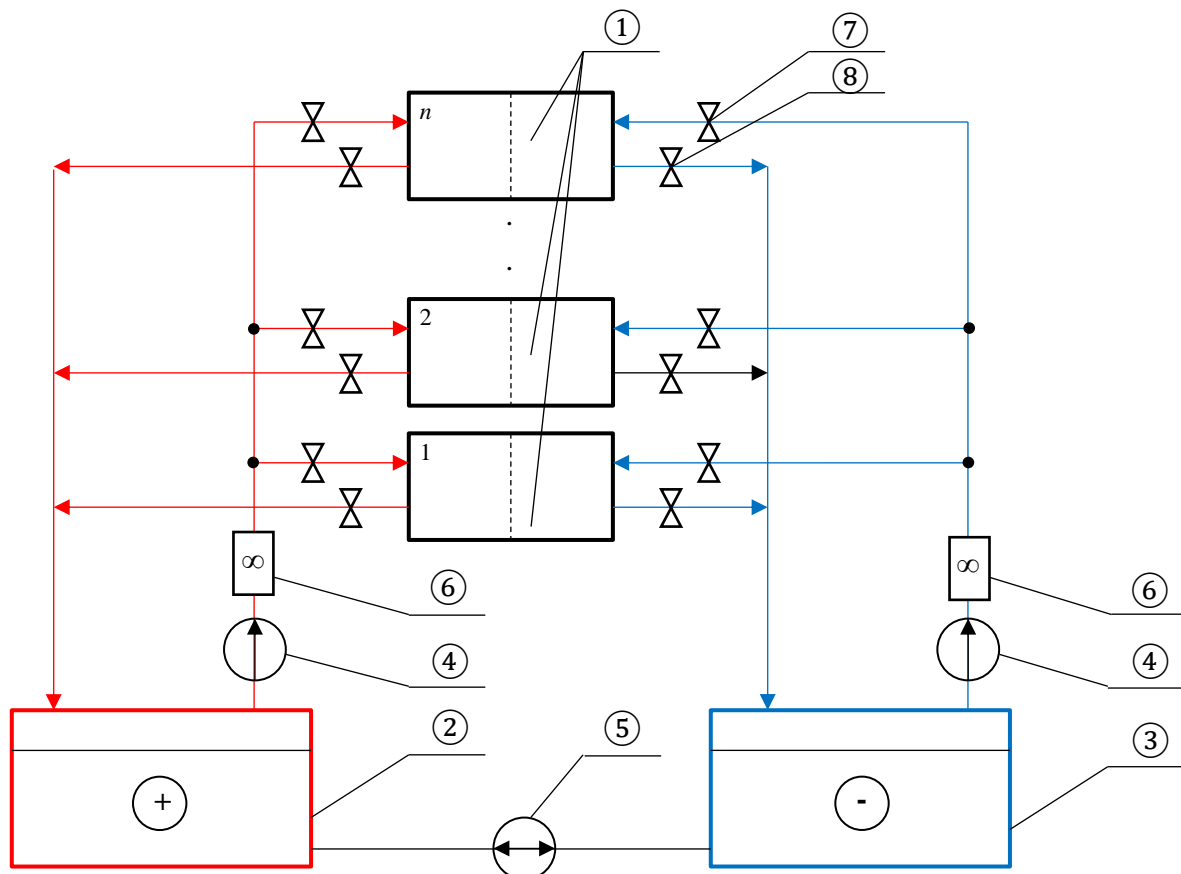


Рисунок 1. Гидравлическая схема соединения нескольких проточных стояков. Перепечатано с разрешения [27]: 1 — стопки ванадиевых окислительно-восстановительных проточных батарей (n шт.); 2 и 3 — емкости с электролитом; 4 — главные электролитные насосы; 5—балансировочный насос; 6 — датчики расхода электролита; 7—входной кран; 8 — выпускной кран.

Остальная часть статьи построена следующим образом. В разделе 2 представлено описание исследуемого прототипа и методики проведения эксперимента. Результаты исследования характеристик батареи и глубины разряда батареи без и после регулирования потока электролита представлены в разделе 3. В разделе 4 описан предлагаемый подход к управлению потоком электролита и его преимущества, включая разработанный клапан давления и оптимальную систему. алгоритм работы.

2. Materials and Methods

Внешний вид прототипа ИБП с двумя стопками полностью ванадиевых проточных батарей показан на рисунке 2. Гидравлическая система каждой батареи может закрываться отдельно с помощью клапанов и датчиков расхода, которые устанавливаются на входе в каждую батарею (рисунок 3). На каждый контур устанавливается один датчик давления, поскольку давление независимо при разделении потока на две трубы. Насосы управляются с помощью преобразователей частоты. Элементы системы представлены в таблице 1

Таблица 1. Элементы системы.

Название	Кол-во
Стек VRFB-5 kW-СЕС	2
Герметичный насос с магнитной муфтой (Zenova MDP-70RM-380)	2
Преобразователь частоты	2
Датчик потока (Burkert type 8011, FS-32)	4
Датчик давления (PM-32)	2
Панель сбора данных	1

В качестве электролита использовали сернокислый электролит с концентрацией ванадия 1,6 моль/л и концентрацией сульфат-иона 3 моль/л. Объем электролита в баках составлял 1,4 м³. Расчет емкости E₀ проводился по кривой расхода по уравнению [28]:

$$E_0 = \int_0^{t_{Dch}} U(t) I(t) dt, \quad (1)$$

где U(t) и I(t) — мгновенные значения напряжения и тока соответственно, t_{Dch} — время разряда.



Рисунок 2. Фотография ИБП с двумя стеклами проточных ванадиевых окислительно-восстановительных батарей.

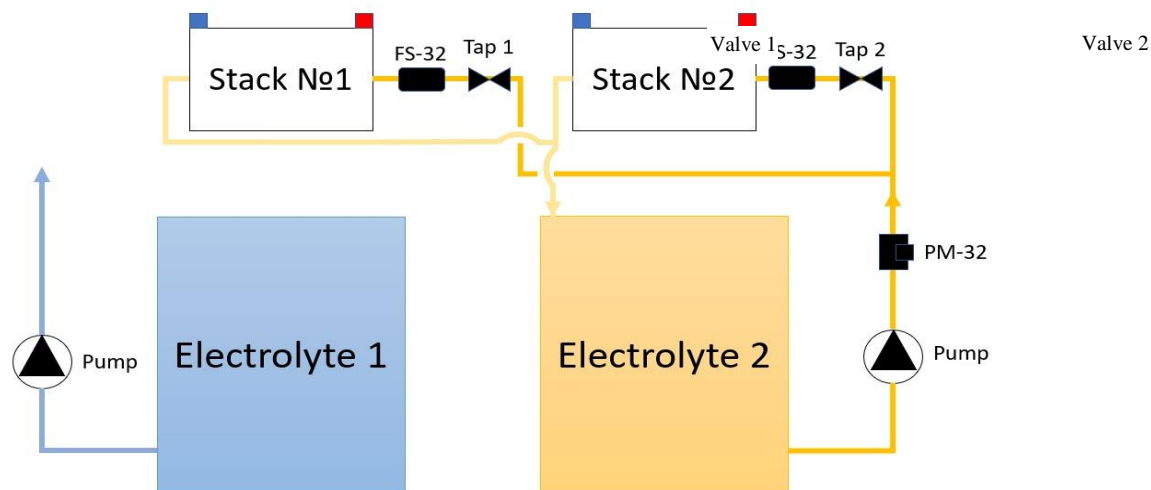


Рис. 3. Гидравлическая схема прототипа ИБП. На схеме показана только гидросистема электролитного контура № 2 (желтого цвета); гидросистема электролитного контура № 1 (синего цвета) аналогична.

Заряд в каждый раз проводился одинаково. В начале электролиты перемешивались, чтобы исключить влияние разбалансировки на результаты эксперимента, контроль за смешиванием электролита проводился с использованием спектрофотометра (на рисунке 4 представлены спектры оптической плотности электролитов в каждом эксперименте перед зарядом). Электролит после смешивания имеет средний заряд ионов ванадия $3,5+$. При этом спектры в каждом эксперименте повторяют друг друга, что доказывает одинаковость исходных условий проведения экспериментов. Определение средней валентности проводилось с использованием калибровочных растворов с содержанием ванадия 1,6 моль/л и ионов VO_2^+ и V^{3+} . Определение концентрации ионов VO_2^+ проводилось сравнением интенсивности линии на 760 нм, а и определение концентрации ионов V^{3+} проводилось сравнением интенсивности линий на 400 нм. Таким образом установлено, что электролит имеет состав 0,8 моль/л VO_2^+ и 0,8 моль/л V^{3+} .

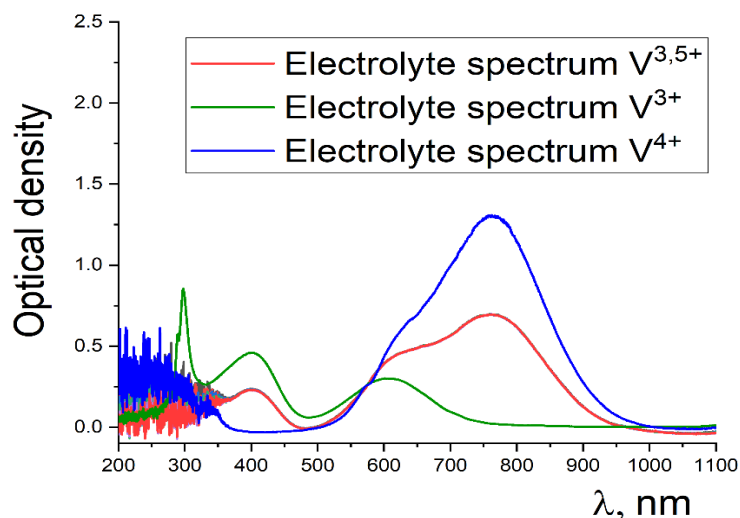


Рис. 4. Спектры оптической плотности ванадиевого электролита перед зарядкой.

Зарядка осуществлялась в режиме IU при полностью открытых клапанах, при этом сначала поддерживался постоянный зарядный ток 100 А до достижения напряжения в системе 116 В; затем в системе поддерживали постоянное напряжение до достижения тока 40 или 20 А.

Перед выпуском клапаны были отрегулированы. Стек с наименьшим гидравлическим сопротивлением (в данной работе это штабель № 2) был частично перекрыт. Регулировка гидросистемы осуществлялась следующим образом: клапаны положительного и отрицательного электролита поворачивались на определенный угол и фиксировались в этом положении. В данном случае угол 90° — это полностью закрытый клапан, а 0° — полностью открытый клапан. После этого включились насосы и начался сброс. Разряд проводился при напряжении системы 63–65 В и постоянном токе 98–102 А. Постоянный ток разряда поддерживался оператором путем изменения сопротивления нагрузки по мере снижения напряжения батареи.

Пауза между процессом заряда и разряда составляла 5 мин, благодаря чему величина саморазряда в батареях оставалась на одном уровне для всех испытаний.

Исследование расхода электролита через каждую батарею проводилось отдельно путем закрытия входных клапанов на другой батарее. Таким образом, электролит прошел только через один стек. Частота насосов задавалась преобразователем частоты.

3. Результаты.

На рисунке 5 показаны зависимости давления электролита через стеки № 1 и № 2 (при закрытой второй батарее) от частоты, установленной на преобразователях частоты. Кривая зависимости имеет экстремум, соответствующий 50 Гц. Это оптимальная частота для работы насоса. Увеличение частоты с целью повышения производительности данной системы невозможно, поскольку скорость потока зависит от входного давления. Это явление наблюдалось и, по-видимому, эта тенденция справедлива и для этого типа насосов.

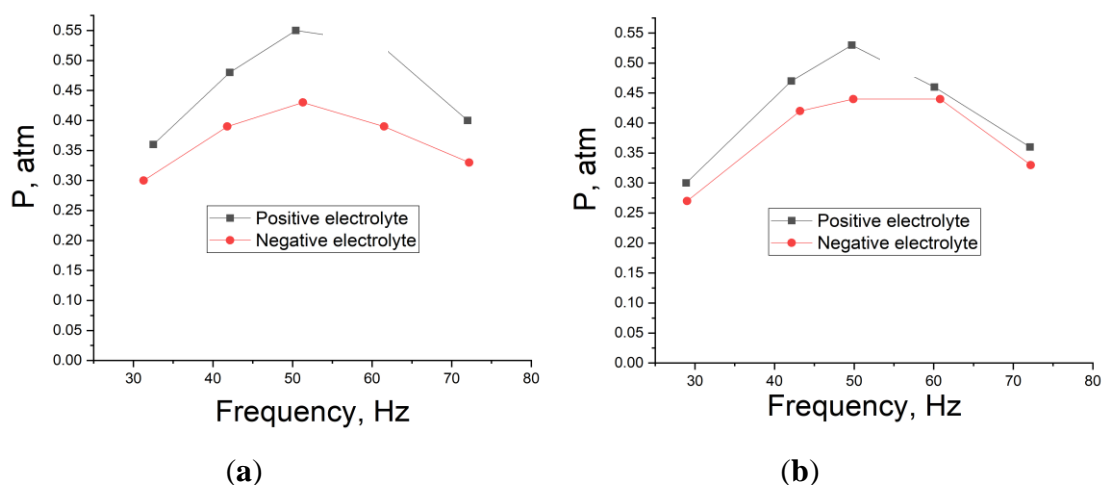
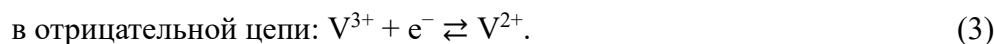
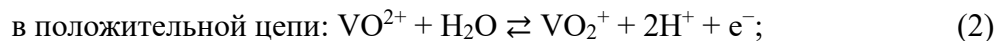


Рис. 5. Зависимости давления в контурах от частоты работы насосов: а – стек № 1; б - стек № 2.

Также стоит отметить, что давление для положительного электролита (гидродинамического контура) было выше, чем для отрицательного электролита. При этом эта разница была практически одинаковой для обоих стеков. Возможно, это связано с плотностью электролита, поскольку в положительной цепи происходят реакции с участием ионов ванадия VO_2^+ , которые более массивны, чем классические ионы ванадия [31]:



Снижение скорости потока при повышении частоты выше 50 Гц подтверждают и данные зависимости скорости потока электролита от давления (рисунок 6). Видно, что расход с ростом давления сначала увеличивался, но затем уменьшался, что связано с уменьшением давления на входе из-за превышения частоты насосов номинальной частоты 50 Гц. Также можно отметить, что расход в отрицательном контуре при равной нагрузке на насосы был выше, чем в положительном контуре. Экстраполируя полученные данные, видно, что коэффициент гидравлического сопротивления отрицательного контура практически одинаков для стеков № 1 и № 2 – 0,451 и 0,447 атм/(м³/ч). Коэффициент гидравлического сопротивления положительного контура сильно различался для стеков № 1 и № 2 – 0,906 и 0,669 атм/(м³/ч) соответственно. Это представляет проблему, так как включение обеих стояков одновременно может привести к уменьшению расхода в стояке № 1 из-за большего гидравлического сопротивления, что, в свою очередь, приведет к снижению ее мощности. Обратные значения коэффициента гидравлического сопротивления суммируются при одновременном включении (рисунок 7).

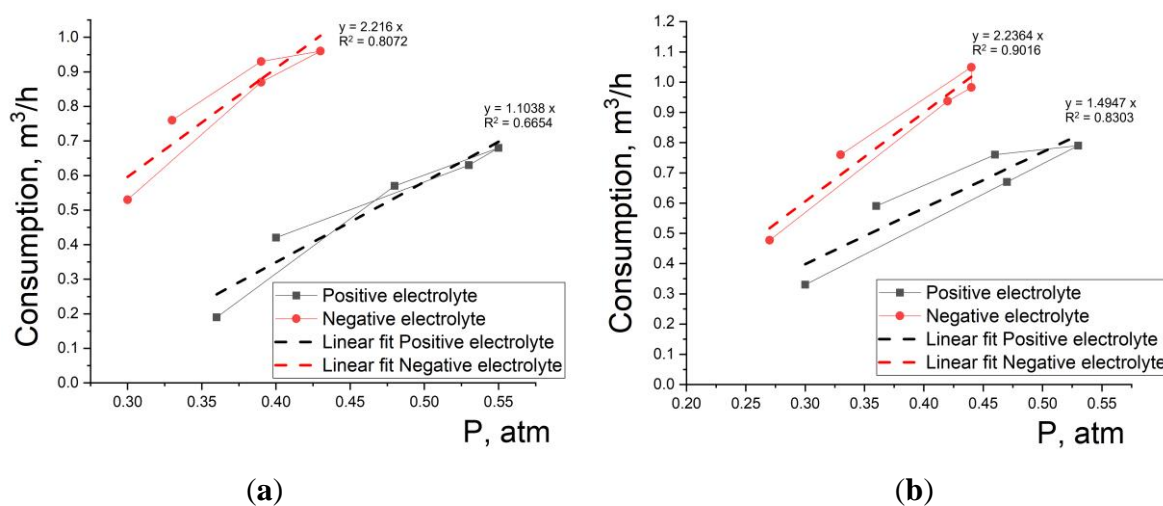


Рис. 6. Зависимости расхода от давления в контурах: (а) стек № 1; (б) стек № 2.

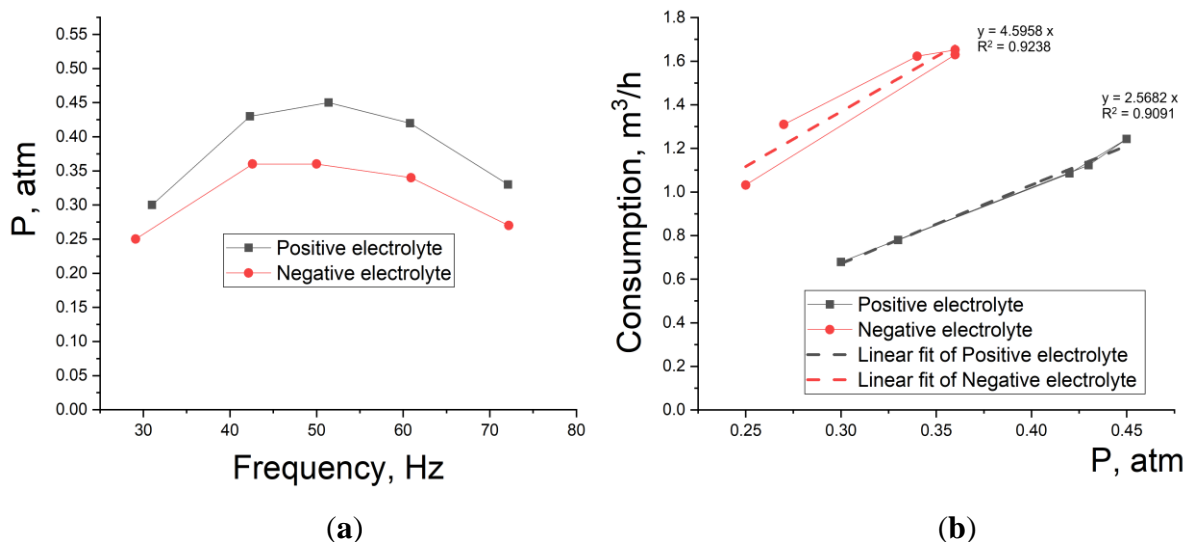


Рис. 7. Зависимость давления в контурах от частоты насосов (а); зависимость расхода от давления в контурах (б) при одновременном включении.

На рисунке 8 показано снижение мощности стека № 1 из-за уменьшения напряжения с течением времени на выводах стека при разряде аккумулятора. Слив происходил при полностью открытых клапанах. Видно, что напряжение на стеке № 2 уменьшалось медленнее, чем на стеке № 1. Этот эффект, как предполагалось выше, связан с большим гидравлическим сопротивлением стека № 1 в положительной цепи.

Чтобы минимизировать этот эффект, клапаны на входе положительного контура стека № 2 были частично перекрыты, тем самым создав дополнительное гидравлическое сопротивление в этом контуре. Эти действия должны частично уравнивать потоки в контурах обеих стеков и привести к балансировке стеков по мощности.

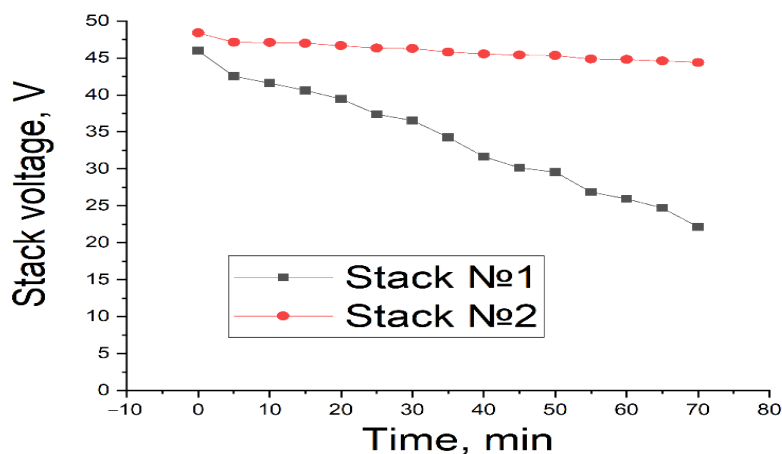


Рисунок 8. Напряжения стеков № 1 и № 2 во время разряда. Клапаны полностью открыты (режим 1 в таблице 2).

В таблице 2 представлены результаты разрядной емкости аккумулятора при различных условиях зарядки и различных положениях клапана. Шаровые краны закрывались под углами 60° и 70°.

Таблица 2. Разрядная емкость аккумулятора для различных условий разряда.

Режим	Конечный ток заряда, А	Положение крана, °	Мощность E_0 , кВтч
1	40	0	7.86
2	20	0	13.26
3	40	60	9.85
4	40	70	1.22
5	40	55–65	10.33
6	20	55–65	15.28

На рисунке 9а показано увеличение времени работы (т.е. времени разряда) при закрытии клапана под углом 60°. В то же время следует предположить, что сильное перекрытие клапана может отрицательно повлиять на поток электролита через стек № 2 и вызвать отрицательный эффект. Напротив, например, это можно наблюдать при закрытии клапана на 70°. Как видно из рисунка 9а, произошло резкое снижение пропускной способности в 8 раз (с 9,85 до 1,22 кВтч, как показано в таблице 2) при закрытии клапанов под углом от 60° до 70°. Поэтому можно предположить, что оптимум открытия клапана составляет до 70°. Такой же эффект снижения емкости при изменении расхода электролита наблюдался в.

Интерес вызывает также возможность динамической регулировки в процессе работы, поскольку с уменьшением заряда электролита разница потоков начинает оказывать все большее влияние. Поэтому были предприняты попытки ручной регулировки клапанов в диапазоне 55°–65°, чтобы выдержать минимальную разницу между напряжениями батареи. Клапаны сначала блокировались под углом 55°, а затем во время работы блокируются под углом 65°. Момент закрытия клапана во время работы обозначен на рисунке 9 как «Переключение». Такой режим работы далее именуется ручной регулировкой. Напряжения батареи для клапанов с ручной регулировкой показаны на рисунке 10. Видно, что разность напряжений оставалась практически неизменной большую часть времени разряда, а напряжение стека № 1 резко возрастало лишь в конце разряда, что по-видимому, связано с глубиной разряда электролита.

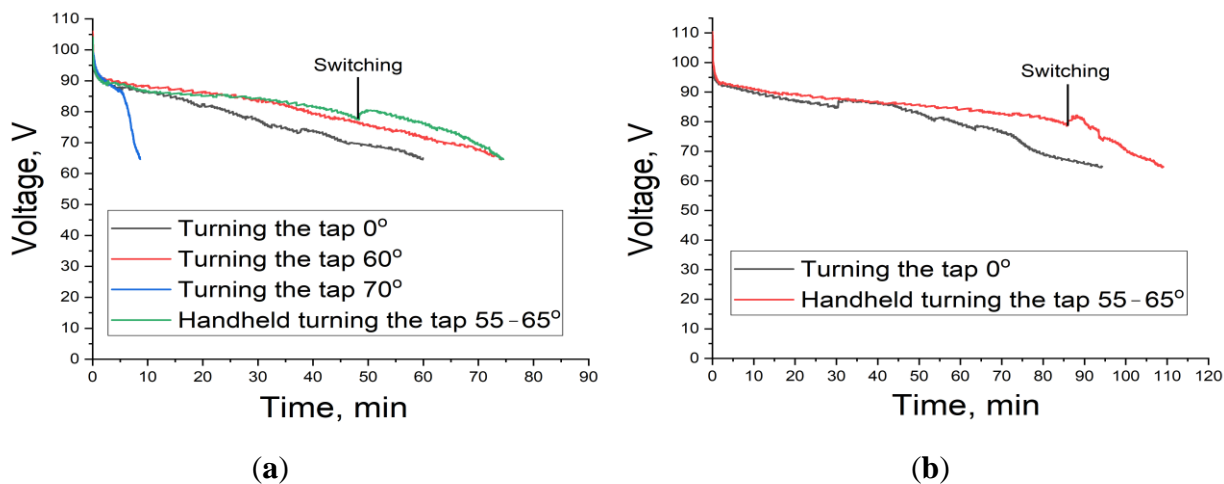


Рисунок 9. Напряжения системы во время разрядки при различных положениях клапана. Конечный ток заряда (а) 40 А; (б) 20 А.

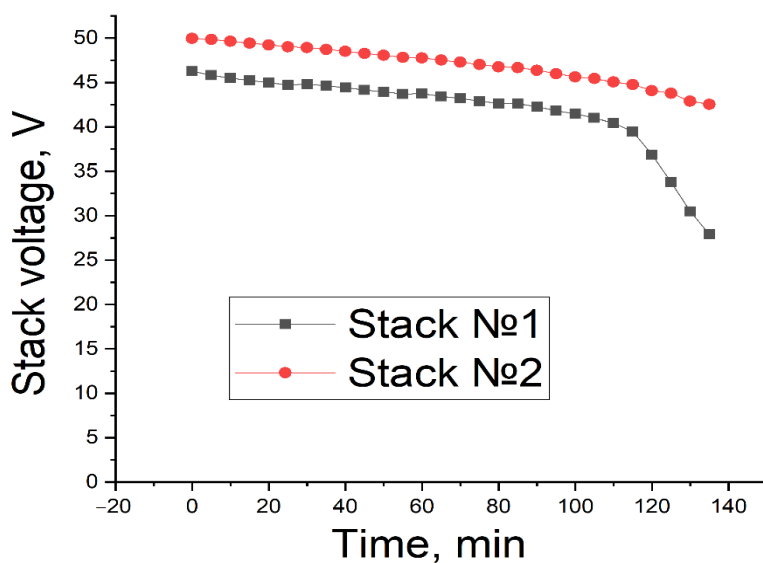


Рисунок 10. Напряжения стеков № 1 и № 2 при разряде с ручной регулировкой. Клапаны положительного контура стека № 2 были закрыты на 60°.

При этом следует отметить, что глубина заряда влияет на емкость аккумулятора, поэтому при заряде аккумулятора до 20 А емкость увеличивалась по сравнению с зарядом до 40 А на 68,7%. Однако при качественном сравнении глубина заряда не играла существенной роли. Если перекрытие клапанов увеличивает производительность, необходимо лишь обеспечить одинаковые условия во время зарядки; например, для режима 2 емкость была выше, чем для режима 3 (табл. 2). Однако причина этого не в положении клапанов, а в глубине первоначального заряда. Перекрытие клапана дало положительный эффект при угле закрытия 60° (режимы 1 и 3) при одинаковой глубине первоначального заряда, как видно из рисунка 9а.

Уменьшение разницы между регулировочным и нерегулировочным (т.е. при полностью открытых клапанах) режимами наблюдалось при глубине заряда до 20 А. Это выражается в

уменьшении отношения времен разряда (Рисунок 9б). Время разряда увеличилось на 15,7% при ручной регулировке. Это сравнительно меньше, чем при глубине заряда до 40 А (рис. 9а), где время разряда при ручной регулировке увеличилось на 24,4%.

Эффект балансировки за счет уменьшения потока через один из стеков можно объяснить следующим образом. На основании проведенных экспериментов можно предположить, что мощность батареи не зависит линейно от расхода электролита, как показано в. Поэтому, если один из стеков работает с избыточной мощностью, снижение расхода через нее даже на 30% может не привести к существенному уменьшению мощности, а увеличение скорости на ту же величину для второй батареи приведет к значительному увеличению. в силе. При этом следует учитывать, что если расход упадет ниже критического значения, то произойдет резкое падение мощности.

Из таблицы 2 видно, что перекрытие клапанов приводит к увеличению пропускной способности при тех же условиях загрузки. Но этот эффект имеет оптимум, поскольку при практически полном перекрытии клапанов наблюдалось снижение пропускной способности, так как расход через стек № 2 значительно уменьшался. В целом стационарное перекрытие клапанов дает прирост мощности на 25%. Но гораздо интереснее ручная регулировка, позволившая добиться увеличения емкости на 31 и 15% при токах заряда 40 и 20 А соответственно. Такой подход открывает новый способ балансировки потоков батарей, где автоматические клапаны могут выступать в качестве балансирующих элементов для регулирования потоков в соответствующих контурах.

Для этой регулировки можно использовать клапан давления. Кажется, это более надежное решение по сравнению с механическими клапанами с движущимися частями. Долговечность механических клапанов значительно ниже, чем у проточной батареи в целом, и этот слабый элемент конструкции может стать причиной разгерметизации гидросистемы. Поэтому с учетом этих рисков предлагается другой способ организации перекрытия потоков.

На рисунке 11 представлена схема сечения клапана отключения по давлению. К отверстию (1) прикладывается давление, которое вызывает сжатие трубы ПВХ (2), блокируя поток через трубы (4). Это приводит к уменьшению потока через клапан. Источником давления может выступать дистиллированная вода или масло. Можно также использовать воздух, но он более инертен из-за своей сжимаемости. Этот метод более безопасен, поскольку сам клапан окружен кожухом (3), который еще защищает поток электролита в случае разрыва трубы (2). Попадание гидравлической жидкости не представляет опасности, если используется глицерин или дистиллированная вода.

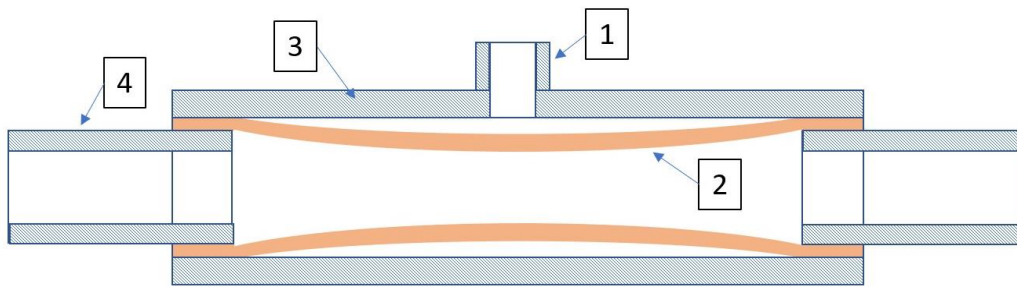


Рисунок 11. Схематическое изображение клапана давления.

Этот подход может быть особенно эффективен для систем, находящихся в эксплуатации в течение длительного времени, поскольку очевидно, что стопки проточных батарей разрушаются неравномерно и некоторые стопки деградируют быстрее, чем другие. Следовательно, их может постигнуть та же участь, что и стек № 1 в этом исследовании, и для повышения производительности системы может потребоваться активная балансировка. При этом для балансировки может потребоваться алгоритм, основанный на показаниях датчиков напряжения и тока. Однако можно использовать алгоритм, который оптимизирует работу системы только на основе показаний датчиков потока. На рисунке 12 показана блок-схема алгоритма оптимизации работы клапана давления.

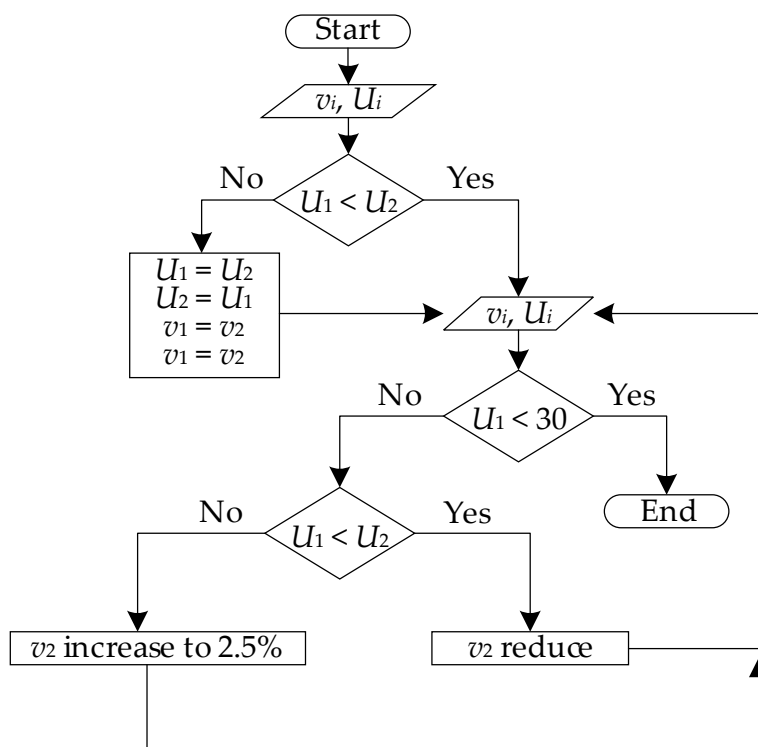


Рис. 12. Алгоритм оптимизации работы напорного клапана.

Алгоритм основан на определении скорости потока (v_i) и напряжения на стеках (U_i). В этом случае сначала необходимо определить, какой стек имеет наименьшее напряжение и присвоить ему номер «1». Далее другому пакету автоматически присваивается номер «2», а затем алгоритм

выбирает оптимальное положение напорного клапана. Важно, чтобы клапан на стеке № 1 не был регулируемым, иначе это может привести к тому, что алгоритм полностью закроет все клапаны на стеках. Ослабление потока следует выполнять только в стеках с наилучшей производительностью. При этом оптимизировать работу клапана необходимо именно по напряжению, а не по расходу, поскольку в батареях могут происходить деградиционные процессы, что также снижает рабочее напряжение, что приводит к сильному расхождению напряжения. при равной скорости потока. Также стоит отметить, что оптимальной работой может быть не ситуация, когда напряжение на стеках выровнялось, а может быть ситуация, когда разность напряжений остается постоянной, что наблюдалось в режиме 6 (рис. 10).

Этот механизм был экспериментально проверен на системе с двумя стеками, но балансировка может быть гораздо сложнее или даже невозможна для системы с тремя и более стеками. Данная проблема требует дальнейшего изучения и разработки математической модели для получения обобщенных выводов.

5. Выводы

В данной работе показано, что балансировка проточных аккумуляторных батарей с помощью клапанов, увеличивающих гидродинамическое сопротивление в одном из контуров, приводит к увеличению глубины разряда. Показано, что активная балансировка (регулировка клапанов во время работы аккумулятора) приводит к увеличению разрядной емкости на 15–31 % (в зависимости от условий зарядки). Также было установлено, что гидродинамическое сопротивление штабелей может сильно различаться, например, в цепи положительного электролита коэффициенты гидравлического сопротивления различались в 1,35 раза.

В данной работе были предприняты первые попытки показать перспективность метода активной гидродинамической балансировки проточной ванадиевой окислительно-восстановительной батареи. Предложены конструкция напорного клапана, которая может обладать большей надежностью, и алгоритм оптимизации его работы. Задача дальнейших исследований – провести теоретические расчеты и апробировать алгоритм оптимизации работы напорных клапанов.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Введение

Система бесперебойного питания с проточным аккумулятором СПБ-ПАКБ-10/30 «Дубна» ШЖИС.565536.002 (далее СПБ-ПАКБ) состоит из двух изделий, функционально связанных между собой в единое целое:

- из шкафа системы бесперебойного питания СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна» ШЖИС. 565536.001 (далее СБП);

- из проточного аккумулятора ПАКБ-10/30 «Дубна» ШЖИС.563139.002 (далее ПАКБ), емкостью 30 квт.час, номинальным напряжением 118В, с насосами, датчиками давления, расхода и температуры электролита, функционирующий под управлением промышленного контроллера.

Областью применения СПБ-ПАКБ являются приемники трехфазного тока напряжением 0,4 кВ, частотой 50 Гц первой категории электроснабжения. В том числе вычислительные комплексы, устройства автоматики и т.д.

Настоящая программа и методика приемочных испытаний выявляет соответствие параметров СПБ-ПАКБ-10/30 «Дубна» ШЖИС. 565536.002 требованиям Технического Задания.

Требования Технического Задания, касающиеся сугубо параметров СБП в рамках данной программы и методики испытаний, не проверяются. Результаты этих испытаний, проведенные на этапе квалификационных испытаний СБП, предоставляются изготовителем.

1 Общие положения.

1.1 Наименование и обозначение изделия

Объектом испытаний являются система бесперебойного питания СБП-ПАКБ-10/30-«Дубна» ШЖИС. 565536.002

1.2 Виды и цель испытаний

1.2.1 Изделие подвергаются приемочным испытаниям.

1.2.2 Целью приемочных испытаний является оценка соответствия разработанного изделия требованиям Технического Задания и требованиям, выявленным в процессе разработки изделия.

1.3 Условия предъявления изделия на испытания

К приемочным испытаниям предъявляется изделие в полном комплекте: в том числе:

- система бесперебойного питания СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна» ШЖИС.565536.001;
- проточный аккумулятор ПАКБ-10/30 «Дубна» ШЖИС 563139.001, емкостью 30 квт, час, мощностью 10 квт и номинальным напряжением 110В, с насосами, датчиками давления, расхода и температуры электролита, с промышленным контроллером ПЛК Овен 200.

1.4 Порядок взаимодействия с представителем заказчика

Взаимодействия представителя изделия с представителем заказчика определяется условиями, оговоренными в договоре на поставку.

2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний.

2.1 Требования к месту проведения испытаний

Испытания проводятся в испытательной лаборатории предприятия-изготовителя, если в отдельных проверках не оговорены иные условия.

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

Испытания проводятся на оборудовании с использованием поверенных измерительных приборов. Используемые при проведении настройки и испытаний оборудование и инструменты должны быть исправными, отвечать всем требованиям безопасности.

Используемые при проведении настройки и испытаний средства измерений должны иметь действующие отметки о поверке.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний

Испытания проводят в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150, если в отдельном методе не оговорены другие условия.

2.4 Требования к подготовке изделия к испытаниям

2.4.1 Изделие, предъявляемое к испытаниям, должно быть настроено и принято службой качества предприятия-изготовителя.

2.4.2 Проточный аккумулятор изделия предъявляется на испытания в заряженном состоянии.

2.4.3 Перед началом испытаний, изделие должно быть выдержано в нормальных климатических условиях не менее 4 часов.

2.5 Требования к порядку работы на изделии по завершении испытаний

По завершении испытаний изделие остается в распоряжении предприятия-изготовителя.

2.6 Требования к персоналу, осуществляющему подготовку к испытанию и испытание

2.6.1 К испытаниям допускается персонал испытательного участка, изучивший схему электрическую принципиальную и руководство по эксплуатации изделия и настоящую методику приёмочных испытаний.

2.6.2 Обслуживающий персонал должен быть аттестован и иметь квалификационную группу не ниже третьей согласно «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» ПТЭЭП и «Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок».

3 Требования безопасности

3.1 Требования безопасности при подготовке изделия к испытаниям

Перед началом испытаний заземлить все составные части СБП-ПАКБ проводом сечением не менее 10 мм.кв.

3.2 Требования безопасности при проведении испытаний

При проведении испытаний изделие должно обслуживаться в соответствии с требованиями действующих правил техники безопасности для электроустановок напряжением до 1000 В.

3.3 Требования безопасности при выполнении работ по завершению испытаний

По окончании приемочных испытаний необходимо:

- отключить испытательное (измерительное) оборудование;
- отсоединить провода от испытательной установки и снять ограждения;
- привести в надлежащий порядок и разместить в специальных шкафах и на стеллажах инструмент, приспособления, приборы и средства защиты.
- доложить о завершении работ вышестоящему оперативному (дежурному) персоналу и оформить окончание работ росписью в оперативном журнале.

4 Определяемые показатели и точность их измерений

4.1 На испытания должны быть предоставлены документы, указанные в таблице 1.

Таблица 1

п/п	Наименование	Обозначение	Примечание
1	Техническое задание на СБП-ПАКБ	Техническое задание	
2	Программа и методика испытаний СБП-ПАКБ	ШЖИС. 565536.002ПМ	
3	Технические условия системы бесперебойного питания СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна»	ШЖИС.565536.001ТУ	
4	Руководство по эксплуатации СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна»	ШЖИС.565536.001РЭ	
5	Паспорт на СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна»	ШЖИС.565536.001ПС	
6	Сборочный чертеж системы бесперебойного питания СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна»	ШЖИС.565536.001СБ	
7	Сборочный чертеж проточного аккумулятора ПАКБ-10/30 «Дубна» ШЖИС 563139.001	ШЖИС 563139.001СБ	
8	Схема структурная СБП-ПАКБ.		См Приложение В
9	Протоколы испытаний СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна».		

4.2 Перечень испытательного оборудования и средств измерений, необходимых для проведения испытаний.

4.3 Объем и последовательность приемочных испытаний СБП-ПАКБ приведен в таблице 2.

4.5 По завершении испытаний должен быть подписан Акт приемочной комиссии.

4.6 Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если изделие выдержало все предусмотренные настоящей методикой испытания и проверки.

Таблица 2.

№ п.п	Наименование испытания	Номера пунктов Технического задания	Номера пунктов методов испытаний
1	Проверка комплектности аппаратной части СБП-ПАКБ	3.1.1...3.1.3,	6.1
2	Проверка комплектности и качества предоставленной документации	5.1.1, 5.1.2, 9.1...9.4	6.2

3	Проверка требований по возможности доступа и осмотра всех элементов, устранению повреждений, устранению течи электролита, замены неисправного оборудования без демонтажа исправного.	3.10.1	6.3
4	Проверка требований к габаритным размерам и массе СБП-ПАКБ	3.10.2, 3.10.3	6.4
5	Проверка требований по наличию антикоррозийных покрытий.	3.10.4, 3.10.6	6.5
6	Проверка требований к контактным электрическим соединениям, прокладке проводников, сечениям проводников, в том числе к проводникам защитного заземления, к маркировке кабелей и проводников. Наличие мер, направленных против ослабления контакта ПАКБ.	3.10.7... 3.10.13	6.6
7	Проверка требований по стойкости материалов гидросистемы ПАКБ к 30% раствору серной кислоты.	3.10.14	6.7
8	Проверка наличия датчиков давления, расхода, температуры электролита и температуры ячеек.	3.10.15	6.8
9	Проверка требований к обрешетке баков с электролитом.	3.10.16	6.9
10	Измерение электрического сопротивления изоляции.	В ТЗ нет требований	6.10
11	Испытание электрической прочности изоляции.	В ТЗ нет требований	6.11
12	Измерение сопротивления заземления	В ТЗ нет требований	6.12
13	Проверка функционирования в нормальных климатических условиях, при нормальных параметрах питания.	п. 3.2.1, табл-1 строки 1, 2. п.п. 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4 п. 3.2.7, строки 1...13 п 3.2.8, п.3.2.9, строки 4,7,9 п. 3.2.10, п. 3.2.11, п. 3.2.12. п. 3.10.5	6.13
14	Проверка требования о номинальном входном напряжении величиной 380В	3.2.1- табл 1, строка 3	Требования, изложенные в таблице 1, строки 3,5...18
15	Проверка требований по допустимому отклонению входного напряжения, от номинального значения.	3.2.1- табл 1, строка 5	В п.п. 3.2.4, 3.2.5.
16	Проверка требований по допустимому диапазону изменения частоты входного напряжения.	3.2.1- табл 1, строка 7	В п.3.2.6, строки 1...5.

17	Проверка требований, по величине номинального входного коэффициента мощности ($\cos \varphi$).	3.2.1- табл 1, строка 8	В п.3.2.7, строки 1...9, В п.3.2.9, строки 1,2,3,5. проверяется при проведении приемочных испытаний изделия СБП-Дубна ШЖИС 565536.001 ТУ. Результаты проверки этих требований берутся из представленных протоколов приемочных испытаний изделия СБП-Дубна ШЖИС 565536.001.
18	Проверка требований по точности стабилизации частоты выходного напряжения.	3.2.1- табл 1, строка 12	
19	Проверка требований по точности стабилизации величины выходного напряжения при работе на симметричную нагрузку.	3.2.1- табл 1, строка 13	
20	Проверка требований по коэффициенту искажений синусоидальности выходного напряжения при работе на номинальную линейную нагрузку.	3.2.1- табл 1, строка 15	
21	Проверка требований по коэффициенту полезного действия (КПД) выпрямителя при номинальной нагрузке.	3.2.1- табл 1, строка 17	
22	Проверка требований по коэффициенту полезного действия инвертора при номинальной нагрузке.	3.2.1- табл 1, строка 18	
23	Проверка требования об обеспечении питания нагрузки переменного тока с характеристиками, указанными в таблице 1, в диапазоне мощности нагрузки от 0 до 100% номинальной мощности.	3.2.4	
24	Проверка требований к времени переключения статического байпаса с питания нагрузки от сети переменного тока, на питание от инвертора (от аккумулятора) при пропадании входного напряжения.	3.2.5	
25	Проверка требования по наличию защиты выпрямителя от перегрузки, защиты преобразовательного блока выпрямителя от перегрева, защиты инвертора от перегрузки по току, защита инвертора от внутренних и внешних коротких замыканий, защита инвертора от перегрева силовой части.)	3.2.6, строки 1,2,3,4,5	
26	Система мониторинга и управления СБП-ПАКБ должна обеспечивать измерение следующих параметров: - входного напряжения СБП (по трем фазам); - входного тока СБП (по трем фазам); - частоты входного напряжения СБП; - выходного напряжения СБП (по трем фазам); - выходного тока СБП (по трем фазам); - частоты выходного напряжения СБП;	3.2.7, строки 1...9.	

	<ul style="list-style-type: none"> - выходного тока ЗВУ; - напряжения в звене постоянного тока; - тока ПАКБ. 		
27	<p>Проверка требований по наличию в системе мониторинга и управления СБП-ПАКБ (в части электрических параметров) следующих видов аварийной и предупреждающей сигнализации:</p> <ul style="list-style-type: none"> - исчезновение или выход за допустимые пределы напряжения питающей сети (основной и резервной); - исчезновение или выход за допустимые пределы выходного напряжения СБП-ПАКБ; - отключение ЗВУ (инвертора) действием внутренних защит; - выход напряжения ПАКБ за границы диапазона допустимых значений; - переключение нагрузки СБП-ПАКБ на питание от аккумуляторной батареи. 	3.2.9, строки 1,2,3,5.	

5 Режимы испытаний изделия

5.1 Режимы испытаний СБП-ПАКБ-10/30

5.1.1 О готовности изделия к испытаниям предприятие-изготовитель должно уведомить Заказчика.

5.1.2 Контроль полноты, достоверности и объективности результатов испытаний, полноты информации, соблюдения сроков испытаний и документальное оформление их результатов осуществляет комиссия.

5.2 Условия аннулирования и возобновления испытаний

5.2.1 Если в процессе испытаний изделия будет обнаружено несоответствие изделия хотя бы одному требованию Технического задания, то изделие считается не выдержавшим испытания и комиссия принимает решение о дальнейшем проведении испытаний и порядке устранения несоответствий.

5.2.2 При проведении испытаний допускается замена вышедших из строя сменных элементов без возврата изделия. В этом случае испытания продолжают по прерванному и последующим пунктам испытаний.

5.2.3 После устранения дефектов, изделие предъявляют для повторной проверки по пунктам, не прошедшим испытания.

5.3 Ограничения и указания

5.3.1 Решение о корректировке схемы производства проверок должно приниматься в обоснованных случаях согласованным решением комиссии и отражаться в протоколе проведения испытаний. Корректировка плана и продолжительности испытаний не должна влиять на качество и объем (количество) выполнения проверок.

5.3.2 В случае возникновения неоднозначной оценки выполнения критериев применяются требования нормативных документов.

6 Методы испытания

6.1 Проверка комплектности аппаратной части СБП-ПАКБ-10/30

6.1.1 Убедиться в наличии:

6.1.1.1 Шкафа системы бесперебойного питания СБП – 15 – 400 – 50 – 110 – УХЛ4 «Дубна» ШЖИС. 565536.001 (далее СБП), состоящего из:

- устройства зарядно-выпрямительного;
- инвертора;
- электронного переключающего устройства (статического байпаса).

6.1.1.2 Проточного аккумулятора ПАКБ-10/30 «Дубна» ШЖИС.563139.002, состоящего из:

- стеков проточного аккумулятора - 2 комплекта;
- баков с положительным и отрицательным электролитом - 2 шт;
- гидросистемы (насосы прокачки электролита – 2 шт, соединительные трубы, запорная арматура, датчики давления (2 шт.), датчики расхода (2 шт.), датчики температуры электролита (2 шт.), датчика температуры ячеек (1 шт.),
- системы мониторинга и управления СБП-ПАКБ на базе программируемого логического контроллера – 1 шт.

Комплектность проверяется путем сличения изделия с конструкторской документацией.

6.1.2 Проверка комплектности аппаратной части СБП-ПАКБ считается выполненной, если присутствуют все составные части, перечисленные в п.п. 3.1.1... 3.1.3 ТЗ, (добавить ... с учетом указаний о изменениях по ходу разработки).

6.2 Проверка комплектности и качества предоставленной документации

6.2.1 Проверить наличие документов перечисленных в таблице 1.

6.2.2 Проверить внешний вид документации - документация должна быть чистой и читаемой, без повреждений листов.

6.2.3 Проверить в основных надписях КД и ТД наличие подписей исполнителей, проверяющих и утверждающих лиц.

6.2.4 Проверить наличие подписей исполнителей, проверяющих и утверждающих лиц в протоколах испытаний и проверок, актах и др. документах.

6.2.5 Проверка комплектности и качества предоставленной документации СБП-ПАКБ считается выполненной, если выполнены требования указанные в п.п. 5.1, 9.1...9.4 ТЗ.

6.3 Проверка требований по возможности доступа и осмотра всех элементов, устранению повреждений, устранению течи электролита, замены неисправного оборудования без демонтажа исправного.

6.3.1 Визуально убедиться в возможности доступа и осмотра всех составных частей ПАКБ, возможности устранения повреждений элементов гидросистемы, замены неисправного оборудования (датчиков, насосов, расходомеров) без демонтажа исправного оборудования.

6.3.2 Требования к ПАКБ, указанные в п.3.10.1 ТЗ считаются выполненными, если проверки указанные в п. 6.3.1 ПМ выполняются.

6.4 Проверка требований к габаритным размерам и массе СБП-ПАКБ.

6.4.1 Измерить габаритные размеры шкафа СБП и ПАКБ (см. Приложение Б), при этом:

- ширина СБП-ПАКБ равна сумме соответствующих размеров СБП и ПАКБ.

- глубина СБП-ПАКБ берется по максимальному размеру СБП или ПАКБ.

- высота СБП-ПАКБ берется по максимальному размеру СБП или ПАКБ.

6.4.2 Измерить массу ПАКБ взвешиванием на весах с погрешностью измерения не более $\pm 2\%$ от измеряемой массы. Взвешивание допускается проводить отдельно по составным частям изделия.

Сведения о реальной массе шкафа системы бесперебойного питания СБП берутся из протоколов на шкаф СБП.

Полная масса СБП-ПАКБ равна сумме масс шкафа системы бесперебойного питания СБП и ПАКБ.

6.4.3 СБП-ПАКБ считается выдержавшей проверку, если габаритные размеры соответствуют требованиям, изложенным в п. 3.10.2 ТЗ, если масса соответствует требованиям изложенных в п. 3.10.3 ТЗ, при этом масса и размеры не превышают указанные в п.п. 3.10.2 и 3.10.3 ТЗ более, чем на 10 %.

6.5 Проверка требований по наличию антикоррозионных покрытий.

6.5.1 Убедиться, что все металлические детали ПАКБ, подверженные коррозии имеют антикоррозионные покрытия.

6.5.2 ПАКБ считается выдержавшими проверку, если покрытия соответствуют требованиям, изложенным в п.п. 3.10.4, 3.10.6 ТЗ.

6.6 Проверка требований к контактными электрическим соединениям, прокладке проводников, сечениям проводников, в том числе к проводникам защитного заземления, к маркировке кабелей и проводников. Наличие мер, направленных против ослабления контакта ПАКБ.

6.6.1 Визуально проконтролировать:

- надежности и качество болтовых электрических соединений;
- целостность и отсутствие механических повреждений проводов, жгутов и кабелей, и наличие маркировки соединений.
- наличие в болтовых электрических соединениях шайб-гровера.

6.6.2. ПАКБ считается выдержавшей проверку, если требования, указанные в п.п. 3.10.7...3.10.13 ТЗ выполнены.

6.7 Проверка требований по стойкости материалов гидросистемы ПАКБ к воздействию 30% раствора серной кислоты.

6.7.1 Убедиться, что все составные части гидросистемы ПАКБ, в том числе трубопроводы, насосы, расходомеры, датчики давления и вентили выполнены из материалов стойких к воздействию агрессивной среды, в том числе к воздействию 30% раствора серной кислоты. Убедиться, что баки с электролитом предназначены для хранения и транспортировки указанной кислоты.

Проверить наличие сертификатов о назначении применяемых материалов и составных частей.

6.7.2 ПАКБ считается выдержавшим проверку, если все элементы, указанные в п. 3.10.14 ТЗ выполнены из материалов стойких к воздействию кислоты, а баки с обрешеткой предназначены для транспортировки и хранения 30% раствора серной кислоты.

6.8 Проверка наличия датчиков давления, расхода, температуры электролита и температуры ячеек.

6.8.1 Убедиться в наличии:

- датчиков давления и расхода в контурах положительного и отрицательного электролитов ПАКБ;
- датчиков температуры в контурах положительного и отрицательного электролитов ПАКБ и датчика температуры в ячеек ПАКБ.

6.8.2 ПАКБ считается выдержавшем проверку, если в гидросистеме присутствуют датчики, указанные в п. 3.10.15 ТЗ.

6.9 Проверка требований к обрешетке баков с электролитом.

6.9.1 Рассмотрев документы на баки с металлической обрешеткой, убедиться, что при нормальном заполнении баков электролитом, и работающими насосами, давление в баках не превысит допустимых значений.

6.9.2 Требование п. 3.10.16 ТЗ к обрешетке считается выполненным, если баки защищены штатной обрешеткой, если выполняются условия указанные в п. 6.9.1 ПМ.

6.10 Измерение электрического сопротивления изоляции

6.10.1 Измерению электрического сопротивления изоляции подвергается только ПАКБ.

Сведения о результатах испытаний сопротивления изоляции шкафа системы бесперебойного питания СБП-15 берутся из протоколов испытаний изделия.

6.10.2 Измерение электрического сопротивления изоляции ПАКБ проводят методом 101 по ГОСТ 26567.

6.10.3 Измерение изоляции производится мегомметром между замкнутыми в группы цепями и отдельными контактами, согласно указаниям таблицы 3.

Таблица 3

Измеряемые цепи	Значение испытательного напряжения*
Между закороченными цепями питания автоматики ПАКБ (закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q1 со стороны сети 220в) и клеммой заземления.	500/≥ 20 МОм
Между закороченными цепями звена постоянного тока (между закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q2) и клеммой заземления.	500/≥ 20 МОм
Между закороченными цепями питания автоматики ПАКБ (закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q1 со стороны сети 220в) и между закороченными цепями звена постоянного тока (между закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q2).	500/≥ 20 МОм
* При нормальных климатических условиях	

6.10.4 Внимание! Перед замыканием между собой шин проточного аккумулятора (выходных контактов включенного автоматического выключателя ПАКБ Q2.) электролит, находящийся в ячейках аккумулятора, должен быть полностью разряжен. При разряде электролита насосы положительного и отрицательного электролитов не должны включаться.

6.10.5 Погрешность измерения сопротивления изоляции не должна превышать ±20 %. Электрическое сопротивление изоляции между закороченными в соответствии с таблицей 3 группами клемм должно быть не менее:

- 20 МОм – в нормальных климатических условиях;
- 5 МОм – при испытаниях на повышенную температуру;
- 1 МОм – при испытаниях на повышенную влажность.

При испытаниях ПАКБ на воздействие повышенной температуры и повышенной влажности измерение электрического сопротивления изоляции проводится без извлечения ПАКБ из камеры тепла и влаги. Если проверить электрическое сопротивление изоляции в камере невозможно, то проверку допускается проводить непосредственно после изъятия из камеры за время не более трех минут.

6.10.6 ПАКБ считается выдержавшим испытание, если величина сопротивления изоляции соответствует величинам указанным п. 6.10.3 настоящей ПМ.

6.11 Испытание электрической прочности изоляции

6.11.1 Испытанию на электрическую прочность изоляции в рамках данной ПМ подвергается только ПАКБ.

Сведения о результатах испытаний прочности изоляции шкафа системы бесперебойного питания СБП-15, берутся из протоколов испытаний СБП-15.

6.11.2. Испытание электрической прочности изоляции проводят методом 102 по ГОСТ26567 в нормальных климатических условиях по ГОСТ15150.

6.11.3. Испытания электрической прочности изоляции проводятся с помощью испытательной установки переменного напряжения частотой 50Гц, между замкнутыми в группы цепями и отдельными контактами, согласно указаниям таблицы 4.

Таблица 4

Измеряемые цепи	Значение испытательного напряжения*
Между закороченными цепями питания автоматики ПАКБ (закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q1 со стороны сети 220в) и клеммой заземления.	2000В, 50 Гц
Между закороченными цепями звена постоянного тока (между закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q2) и клеммой заземления.	2000В, 50 Гц.
Между закороченными цепями питания автоматики ПАКБ (закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q1 со стороны сети 220в) и между закороченными цепями звена постоянного тока (между закороченными клеммами включенного автоматического выключателя Q2).	2000В, 50 Гц.

6.11.4 Внимание! Перед замыканием между собой шин проточного аккумулятора (выходных контактов включенного автоматического выключателя ПАКБ Q2.) электролит, находящийся в ячейках аккумулятора, должен быть полностью разряжен. При разряде электролита насосы положительного и отрицательного электролитов не должны включаться.

6.11.5 В процессе испытаний напряжение должно повышаться до заданных значений за время не более 10 секунд.

Напряжение должно повышаться плавно или ступенями по 5% от испытательного напряжения, начиная со значения не более 50%.

Испытываемую цепь выдерживать под испытательным напряжением в течение 1 минуты, после чего напряжение плавно или ступенями понизить до 30% от испытательного напряжения и отключить.

6.11.6 ПАКБ считается выдержавшим испытание, если не произошло пробоя изоляции или поверхностного перекрытия. Появление коронного разряда или шума не является признаком неудовлетворительных испытаний.

6.12 Измерение электрического сопротивления заземления металлических частей ПАКБ, доступных прикосновению

6.12.1 Измерению электрического сопротивления заземления подвергается только ПАКБ.

Сведения о результатах измерения электрического сопротивления заземления шкафа системы бесперебойного питания СБП-15 берутся из протоколов испытаний изделия.

6.12.2 Испытания электрического сопротивления заземления металлических частей, доступных прикосновению проводят по ГОСТ 26567, метод 103-1.

6.12.3 Испытание электрического сопротивления заземления проводят с помощью миллиметра Е6-18/1 между клеммой заземления и точками на корпусе ПАКБ.

6.12.3 ПАКБ считается выдержавшим испытание, если значение измеренного сопротивления не превышает 0,1 Ом

6.13 Проверка функционирования СБП-ПАКБ в нормальных климатических условиях, при номинальных параметрах питания

6.13.1 Испытания проводить в помещении испытательной лаборатории на стенде испытательном (СтИ).

Перед проведением данных испытаний необходимо полностью зарядить проточный аккумулятор.

6.13.2 Проконтролировать состояние коммутационных аппаратов СБП (см. Приложение В):

- коммутационный аппарат обводной линии (QS3) должен быть разомкнут;
- входной и выходной коммутационные аппараты ЭПУ (QS2 и QS4) должны быть замкнуты;
- коммутационный аппарат, основного входа СБП (QS1) должен быть замкнут;
- коммутационный аппарат подключения к звену постоянного тока ПАКБ (QS5) должен быть замкнут.

6.13.3 Проконтролировать состояние коммутационных аппаратов ПАКБ (см. Приложение В):

- коммутационный аппарат (Q1), подающий напряжение сети 220В, 50 Гц, для питания автоматики ПАКБ, должен быть разомкнут;
- коммутационный аппарат (Q2), подключающий ПАКБ к звену постоянного тока в СБП должен быть разомкнут.

6.13.4 Проконтролировать состояние коммутационных аппаратов СтИ:

- коммутационные аппараты СтИ, подающие напряжение на основной и резервные входы СБП, должны быть разомкнуты.

6.13.5. Подключить к испытательному стенду:

- основной вход питания СБП (клеммы X101);
- резервный вход СБП (клеммы X301);
- выход СПБ (клеммы X302) подключить к нагрузке, при этом нагрузка должна быть установлена в положение «1 кВт».

При подключении основной и резервной сети, убедиться в одинаковой последовательности фаз на входах.

Допускается основной и резервный входы СБП подключить к одной сети напряжения переменного тока.

6.13.6 Соединить звено постоянного тока СБП (клеммы X102) с выходным коммутационным аппаратом ПАКБ (Q2), при подключении соблюдать полярность напряжения.

6.13.7 Подать с СтИ на основной и резервный входы СБП питание с номинальными значениями напряжения и частоты.

6.13.8 После подачи питания на входы СБП, проконтролировать запуск внутренних источников питания СБП, проконтролировать автоматический запуск проверки системы принудительного охлаждения силовых модулей ЗВУ и инвертора, (тем самым убедиться в выполнении требования п. 3.10.5 ТЗ), проконтролировать запуск основного пульта управления СБП.

6.13.9 Убедиться в соответствии состояния (положения) коммутационных аппаратов их отображению на мнемосхеме пульта управления СБП.

6.13.10 Убедиться в выполнении требований п. 3.2.7 ТЗ (строк 1,2,3) о индикации на пульте управления СБП параметров:

- напряжения основного и резервного входов СБП;
- тока основного и резервного входов СБП;
- частоты напряжения основного и резервного входов СБП.

6.13.11 Убедиться в выполнении требований п. 3.2.7 ТЗ (строк 4,5,6), о индикации на пульте управления СБП параметров:

- выходного напряжения инвертора;
- выходного тока инвертора;
- частота выходного напряжения инвертора.

Убедиться, что на выходе СБП присутствует напряжение 380В. В случае отклонения выходного напряжения от указанного значения, откорректировать уставку выходного напряжения.

6.13.12 Убедиться в выполнении требований п. 3.2.7 ТЗ (строк 7.8.9), о индикации на пульте управления СБП параметров:

- выходного напряжения ЗВУ,
- выходного тока ЗВУ;
- тока заряда/разряда аккумулятора, который в данном случае должен быть равен нулю.

Убедиться, что величина выходного напряжения ЗВУ (звено постоянного тока) равна 118В. В случае отклонения выходного напряжения ЗВУ от указанного значения, откорректировать уставку выходного напряжения.

6.13.13. Кабелем USB подключить к контроллеру ПАКБ компьютер №1 используемый в качестве выносного дисплея ПАКБ с клавиатурой. (См. Приложение В). Включив компьютер №1, запустить программу управления логическим контроллером ПАКБ.

6.13.14 Кабелем Ethernet подключить к контроллеру ПАКБ компьютер №2, используемый в качестве компьютера системы верхнего уровня АСУ ТП (см Приложение В). Включив компьютер

№2, запустить программу удаленного управления контроллером ПАКБ.(протоколы подключения верхнего уровня - HTTP и HTTPS)

6.13.15 Включить коммутационный аппарат ПАКБ Q1, питающий автоматику проточного аккумулятора.

6.13.16 Убедиться, что контроллер ПАКБ запустил прокачку электролита, длящуюся 60 секунд.

6.13.17 Убедиться в выполнении требований, изложенных в п.3.2.7 ТЗ, строки 8...13 о наличии индикации на дисплее ПАКБ:

- напряжения аккумулятора;
- тока заряда/разряда аккумулятора;
- расхода положительного и отрицательного электролита;
- давлений в контурах прокачки положительного и отрицательного электролитов;
- разности давления между контурами прокачки положительного и отрицательного электролитов;
- температуры положительного и отрицательного электролитов;
- температуры ячеек ПАКБ.

6.13.18 Убедиться в индикации параметров, перечисленных в п. 6.13.17 ПМ на экране компьютера верхнего уровня (на экране компьютера №2), тем самым убедиться в выполнении требования п. 3.2.11 и 3.2.12 ТЗ о наличии связи с верхним уровнем управления.

6.13.19 Из меню настройки ПАКБ (с компьютера ПАКБ), задать порог срабатывания аварии по превышению разницы давления между контурами положительного и отрицательного электролитов равным 0,5 атм, задать обороты насосов положительного и отрицательного электролитов, равными 15 Гц.

6.13.20 Убедиться, что расходы положительного и отрицательного электролитов равны 10 ± 1 л\с. (уточнить).

6.13.21 Убедиться, что давления в контурах положительного и отрицательного электролитов равны $0,2 \pm 0,1$ атм, а разность давлений не превышает $0,1 \pm 0,05$ атм.

6.13.22 Убедиться, что параметры, перечисленные в п. 6.13.20 и 6.13.21 ПМ отражаются на дисплее компьютера верхнего уровня, тем самым убедиться в выполнении требования п.п. 3.2.11 и 3.2.12.ТЗ о связи с верхним уровнем управления.

6.13.23 Из меню настройки ПАКБ (с компьютера ПАКБ), ступенями по 3 ГЦ увеличивать обороты насоса положительного электролита, до появления сигнала аварии о недопустимом давлении между контурами прокачки положительного и отрицательного электролитов (недопустимое давление на мембрану), при этом превышение давления наблюдается с стороны контура прокачки положительного электролита.

6.13.24 Убедиться в выполнении требования п. 3.2.9 ТЗ строка 7 о реакции на превышение допустимого давления на мембрану, при этом:

- насосы выключились;

- на экране контроллера ПАКБ отразилась аварийная сигнализация о превышении порога допустимой разницы давлений между контурами положительного и отрицательного электролитов, при этом превышение давления наблюдается со стороны контура прокачки положительного электролита.

6.13.25 Сквитировать аварию.

6.13.26 Повторить действия указанные в п.п. 6.13.19...6.13.22.

6.13.27 Из меню настройки ПАКБ (с компьютера ПАКБ), ступенями по 3 Гц увеличивать обороты насоса отрицательного электролита, до появления сигнала аварии о недопустимом давлении между контурами прокачки положительного и отрицательного электролитов (недопустимое давление на мембрану), при этом превышение давления наблюдается с стороны контура прокачки отрицательного электролита.

6.13.28 Убедиться в выполнении требования п. 3.2.9 ТЗ строка 7 о реакции на превышение допустимого давления на мембрану, при этом:

- насосы выключились;

- на экране контроллера ПАКБ отразилась аварийная сигнализация о превышении порога допустимой разницы давлений между контурами положительного и отрицательного электролитов, при этом превышение давления наблюдается с стороны контура прокачки отрицательного электролита.

6.13.29 Сквитировать аварию.

6.13.30 Войти в меню настроек ПАКБ и задать обороты насосов прокачки положительно и отрицательного электролитов, равными 15 Гц.

6.13.31 Зафиксировать текущее значение температуры в контуре положительного электролита.

6.13.32 Задав порог срабатывания защиты по превышению температуры в контуре прокачки положительного электролита на 1 градус меньше зафиксированного, убедиться в выполнении требования п. 3.2.9 ТЗ, строка 4, о реакции на недопустимое повышение температуры в контуре положительного электролита, о чем свидетельствует реакция:

- насосы выключились;

- на экране контроллера отразилась аварийная сигнализация о повышенной температуре в контуре прокачки положительного электролита.

6.13.33 Сквитировать аварию.

6.13.34 Войти в меню настроек ПАКБ и задать обороты насосов прокачки положительно и отрицательного электролитов, равными 15 Гц.

6.13.35 Зафиксировать текущее значение температуры в контуре прокачки отрицательного электролита.

8.13.36 Задав порог срабатывания защиты по превышению температуры в контуре прокачки отрицательного электролита на 1 градус меньше зафиксированного, убедиться в выполнении

требования п. 3.2.9 ТЗ, строка 4, о реакции на недопустимое повышение температуры в контуре отрицательного электролита, о чем свидетельствует реакция:

- насосы выключились;

- на экране контроллера отразилась аварийная сигнализация о повышенной температуре в контуре прокачки отрицательного электролита.

6.13.37 Сквитировать аварию.

6.13.38 Войти в меню настроек ПАКБ и задать обороты насосов прокачки положительно и отрицательного электролитов, равными 15 Гц.

6.13.39 Зафиксировать текущее значение температуры ячеек.

8.13.40 Задав порог срабатывания защиты по превышению температуры ячеек на 1 градус меньше зафиксированного, убедиться в выполнении требования п. 3.2.9 ТЗ, строка 4, о реакции на недопустимое повышение температуры ячеек, о чем свидетельствует реакция:

- насосы выключились;

- на экране контроллера отразилась аварийная сигнализация о повышенной температуре ячеек.

6.13.41 Сквитировать аварию.

6.13.42 Из меню настроек контроллера ПАКБ задать интервал между прокачками равным – 60 секунд.

6.13.43 Наблюдая за работой ПАКБ в течении 10 минут, убедиться, что время прокачки равно 60 секунд, пауза между прокачками равна 60 секунд. Убедиться, что при прокачке задание на обороты насосов прокачки отрицательного и положительно электролитов, равны 50 Гц, а расход отрицательного и положительного электролитов равен 50 ± 10 л/с, что свидетельствует о выполнении требования п.3.2.8 ТЗ об управлении насосами прокачки системой мониторинга и управления.

6.13.44 Из меню настроек контроллера ПАКБ и задать интервал между прокачками равным – 24 часа.

6.13.45 Включив коммутационный аппарат Q2 ПАКБ, подключить к звену постоянного тока СБП проточный аккумулятор.

6.13.46 Убедиться, в появлении на дисплеях СПБ и ПАКБ ток заряда величиной до 100А.

6.13.47 Контролируя выходное напряжение ЗВУ и ток заряда аккумулятора на панели СБП, дождаться, пока аккумулятор полностью зарядится. Критерием полной зарядки аккумулятора является:

- выходное напряжение ЗВУ равно 118В;

- ток заряда не превышает 0,1 А.

6.13.48 Отключив от СБП нагрузку, перевести его в режим холостого хода.

6.13.49 Убедиться, что параметры выходного напряжения СБП не изменились.

6.13.50 Установив на выходе СПБ нагрузку 10 кВт убедиться, что требование, изложенное в п.3.2.1, в таблице 1, в строке 1 о номинальной мощности равной 10 кВт выполняются.

6.13.51 Сравнить значения выходного напряжения при нагрузках от 0 до 10 кВт, убедиться, что требования п. 3.2.4 ТЗ о работоспособности инвертора СБП при изменении нагрузки в диапазоне от нуля до 100% выполняются.

6.13.52 Отключив на СТИ напряжение питания основного входа СБП, убедиться в выполнении требования п. 3.2.9 ТУ, строка 9, о переключении нагрузки СБП-ПАКБ на питание от аккумуляторной батареи, о чем свидетельствует:

- выключение ЗВУ;

- сообщения на дисплее СБП о питании инвертора от аккумулятора.

Непосредственно при отключении питания основного ввода зафиксировать отданную в нагрузку энергию E_1 , выраженную в кВт*час.

6.13.53 Убедиться, что при падении напряжения в звене постоянного тока до 70 В:

- СБП и ПАКБ подадут сигнал о разряде аккумулятора;

- выключится инвертор;

- ЭПУ переключится в положение подачи питания к нагрузке от резервного ввода.

- ток аккумулятора станет равен нулю.

Непосредственно при окончании разряда аккумулятора, зафиксировать отданную в нагрузку энергию E_2 , выраженную в кВт*час.

6.13.54 Вычислить номинальную емкость СБП-ПАКБ по формуле:

$$E = E_2 - E_1 \text{ (кВт*час)}$$

где:

E – номинальная емкость СБП-ПАКБ (кВт*ч).

E_1 – отданная в нагрузку энергия перед началом измерения номинальной емкости СБП-ПАКБ (кВт*час).

E_2 – отданная в нагрузку энергия по окончании измерения номинальной емкости СБП-ПАКБ (кВт*час).

6.13.55. Убедиться, что требование, изложенное в п. 3.2.1 ТЗ, таблица 1, строка 2 о номинальной емкости СБП-ПАКБ равной не менее 30 кВт*час выполняется.

6.13.56 Задать с СТИ нагрузку 1 кВт.

6.13.57 С СТИ подать питание на основной ввод СБП, при этом:

- включится ЗВУ;

- включится инвертор;

- ЭПУ останется в положение подачи питания нагрузки от резервного ввода;

- аккумулятор начнет заряжаться током 100А (выполнение требования п. 3.2.3 ТЗ о заряде методом «IU», фаза «I»).

6.13.58 Убедиться, что по достижению напряжения в звене постоянного тока 100 В:

- ЭПУ переключится в положение подачи питания от инвертора к нагрузке;
- ЗВУ начнет одновременно заряжать аккумулятор током 70А и через инвертор питать нагрузку напряжением 380В, что свидетельствует о реализации требования п 3.2.2 ТЗ

6.13.59 Убедиться, что по достижении напряжения в звене постоянного тока 118В, ток заряда начнет снижаться, а напряжение останется равным 118В, что свидетельствует о реализации требования п. 3.2.3 ТЗ – о заряде методом «IU», в фазе «U».

6.13.60 СБП-ПАКБ считается выдержавшим испытание, если все индикации, все показания датчиков, все реакции на управляющие воздействия, все реакции на превышения параметров происходили так, как описано в п.п. 6.13.1 ... 6.13.59 настоящей ПМ.

Перечень оборудования для проведения контроля и испытаний

Таблица А1

Наименование оборудования, СИ	Класс точн.	ГОСТ, ТУ, чертёж	Примечание
Активная нагрузка Сопротивление, Ом – (0,005-50) Ом, мощностью, кВт – 20, не менее			В температурном диапазоне от 20 до 80 °С
Амперметр Э514	0,5	ГОСТ 8711	
Весы ВЭК-5000	III	ТУ 4274-004-54260022	
Вольтметр Э545	0,5	ГОСТ 8711	(0 – 500) V
Имитатор перегрузки			Резистор проволочный R ≈ 150 Вт
Линейка металлическая-500, L – 500 мм		ГОСТ 427	
Мегомметр Fluke 1550 0-10000 МОм. Испытательные напряжения, В – 100, 250, 500	5		Для измерения сопротивления изоляции
Микроомметр ЦС4105 Диапазон измерения, мОм 0,01 – 50000; погрешность ± 4 %, не более			Для измерения переходных сопротивлений
Пробойная установка УПУ-10 Диапазон регулировки выходного напряжения переменного тока, В – (100 – 2500); частоты, Гц – (50 ± 1), Максимальный выходной ток, А – 0,05; Номинальная выходная мощность, ВА – 1250			Для проверки электрической прочности изоляции
Регистратор РЭС-3	-	ТУ 4226-002-39917878 ГОСТ 22261	
Рулетка измерительная РФЗ-5-19	3	ГОСТ 7502	
Токоизмерительные клещи Fluke 355	2,5	ГОСТ 22261	
Трансформатор тока УТТ-5М	0,2	ГОСТ 23624	

Компоновка СБП-ПАКБ

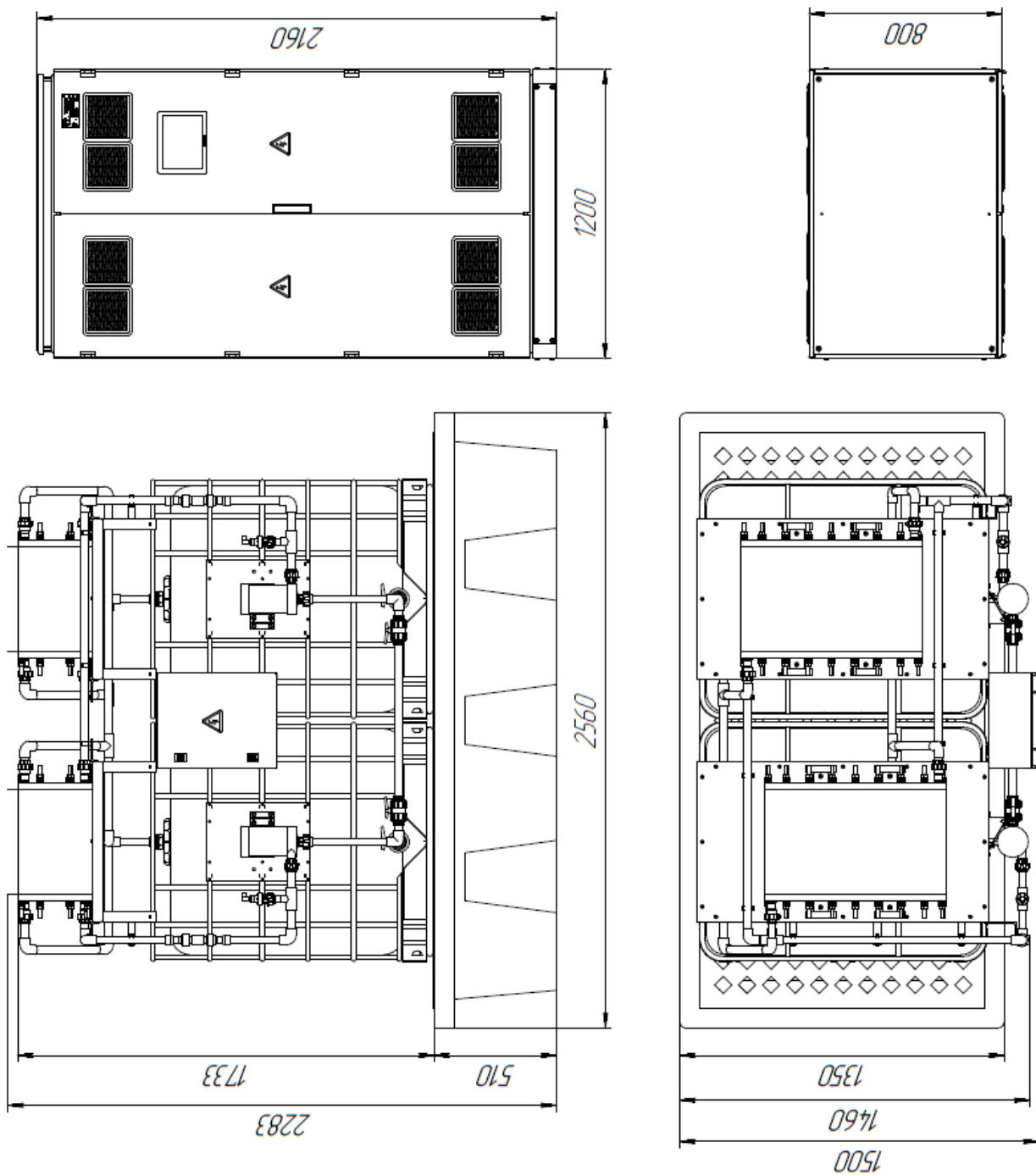


Рисунок Б1 Габаритный чертеж и общий вид СБП-ПАКБ

Схема электрическая структурная СБП-ПАКБ

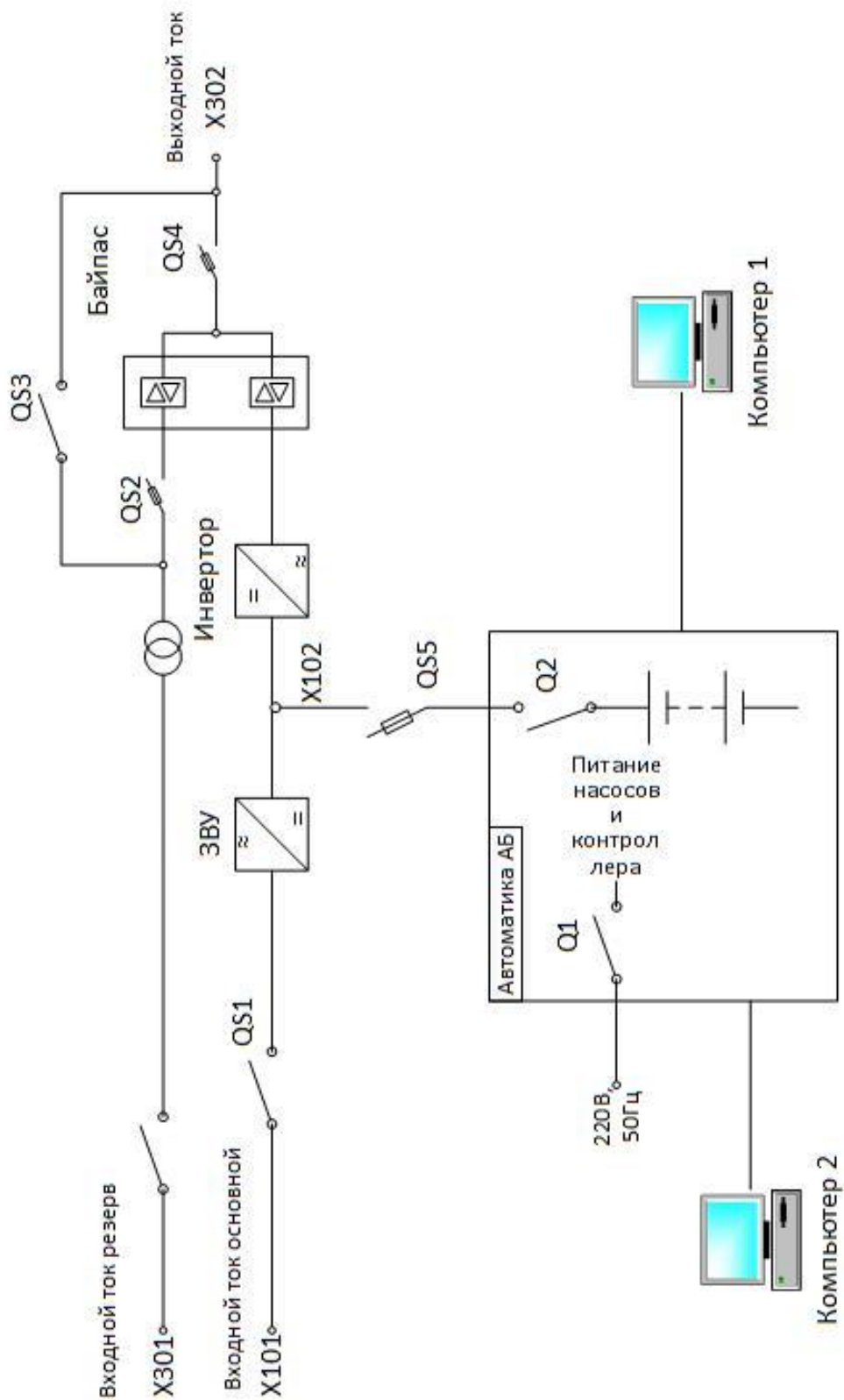


Рисунок В1 Схема структурная СБП-ПАКБ

Перечень принятых обозначений и сокращений

В настоящей программе и методике испытаний применены следующие обозначения и сокращения:

АВР – автоматическое включение резерва;

КД – конструкторская документация;

КЗ – короткое замыкание;

КПД – коэффициент полезного действия;

М – умеренно-холодный морской климат;

НД – нормативный документ;

ОТК – отдел технического контроля;

ПАКБ – проточный аккумулятор;

ПДК – предельно-допустимые нормы;

При – приемочные испытания;

ПМ – программа и методика испытаний;

ПСИ – приемо-сдаточные испытания;

РЭ – руководство по эксплуатации;

СтИ – стенд испытательный;

СБП – системы бесперебойного питания;

СИ – средства измерений;

ТВ – развязывающий трансформатор (в выпрямителе);

ТИ – входной трансформатор инвертора;

ТР – трансформатор резервной линии;

ТУ – технические условия;

УХЛ – умеренно-холодный макроклимат;

ЭД – эксплуатационная документация;

ЭПУ – электронное переключающее устройство.

KKS - (нем. Kraftwerk-Kennzeichensystem) система кодирования для электростанций.

Mod Bus RTU – открытый коммуникационный протокол, основанный на архитектуре ведущий-ведомый (master-slave).

RS485 – интерфейс (англ. Recommended Standard 485) — стандарт физического уровня для асинхронного интерфейса. Способ передачи сигнала – дифференциальный.

В настоящей программе и методике применены следующие термины с соответствующими определениями:

безотказность: свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения .

вероятность безотказной работы: вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет;

время переключения: время, в течение которого изделие переходит с основной сети на резервную;

выпрямитель: преобразователь электрической энергии, который преобразует однофазные или многофазные переменные токи в однонаправленный ток;

гальваническая связь: наличие одно или двухполюсной кондуктивной электрической связи между двумя цепями;

долговечность: свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния;

инвертор: преобразователь электрической энергии, который преобразует постоянный ток в однофазные или многофазные переменные токи;

коэффициент гармонических искажений: величина, выражающая степень нелинейных искажений напряжения и равная отношению среднеквадратичного напряжения суммы высших гармоник сигнала, кроме первой, к напряжению первой гармоники при воздействии на вход изделия синусоидального сигнала;

коэффициент мощности cosφ: отношение потребляемой активной мощности к полной мощности;

коэффициент небаланса выходного напряжения: величина, равная отношению размаха небаланса выходных напряжений к номинальному значению выходного напряжения;

коэффициент полезного действия, КПД: отношение активной выходной мощности к активной входной мощности изделия;

коэффициент применяемости: отношение общего количества типоразмеров составных частей изделия к количеству типоразмеров оригинальных составных частей;

коэффициент пульсации: величина, равная отношению наибольшего значения переменной составляющей пульсирующего напряжения к его постоянной составляющей;

дистанционный мониторинг: отображение информации о текущем состоянии изделия на устройстве оператора, находящегося удаленно;

наработка: продолжительность или объем работы объекта

наработка до отказа: наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа;

номинальное значение параметра электротехнического изделия: значение параметра, указанное изготовителем, при котором изделие должно работать, являющееся исходным для отсчета отклонений;

номинальное напряжение изоляции: значение напряжения изоляции, которое используется при испытании электроизоляционных средств и проверке расстояния утечки;

отказ: событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта;

ресурс: суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния;

сейсмостойкость: способность изделия сохранять прочность, устойчивость, герметичность и работоспособность во время и после землетрясения;

срок службы: календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после капитального ремонта до момента достижения предельного состояния;

ускоренный заряд: заряд аккумуляторной батареи за минимально допустимое по условиям неповреждения время после полного или частичного разряда;

электромагнитная совместимость технических средств: способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам;

электроприемники первой категории - электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения (по ПУЭ).

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ НА АНТИПЛАГИАТ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «МППОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ».

С.А. Колгин



2024 г.

АКТ

внедрения в производственный процесс результатов кандидатской диссертации Кузьмина И.Н.

Результаты диссертационной работы Кузьмина И.Н. «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОТОЧНОГО АККУМУЛЯТОРА», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы, используются в разработках и производственных процессах АО «МППОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ».

Совместные разработки алгоритмов управления гидравлической системы проточного аккумулятора и алгоритмы управления зарядных и разрядных преобразователей позволили оптимизировать работу систем бесперебойного питания для специализированных потребителей.

Заместитель генерального директора

по науке и инновациям

АО «МППОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ»,

к. ф.-м. н.

Е.С. Осетров

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»
(НГТУ)

АКТ

№ _____

г. Нижний Новгород

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор / проректор по
образовательной деятельности НГТУ

Ивашкин Е.Г.

_____ 2024 г.



О внедрении в учебный процесс результатов кандидатской диссертации Кузьмина И.Н.

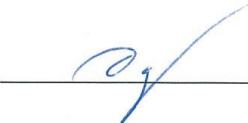
Мы, нижеподписавшиеся, начальник учебного отдела ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ) начальник учебного отдела НГТУ Мухина И.В., директор образовательно-научного института электроэнергетики НГТУ, д.т.н., доцент Дарьенков А.Б., заведующий кафедрой «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ, к.т.н., доцент Севостьянов А.А., составили настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы Кузьмина И.Н.: "Электротехнический комплекс специализированного источника питания на основе проточного аккумулятора" внедрены в учебный процесс кафедры "Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника" НГТУ.

Материалы диссертационной работы используются при чтении лекций по курсам "Автоматизация и управление систем электроснабжения", "Специальные вопросы электроснабжения", "Энергоснабжение" для магистров по направлению 13.04.02 "Электроэнергетика и электротехника" и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Начальник учебного
отдела НГТУ

 Мухина И.В.

Директор образовательно-научного
института электроэнергетики НГТУ,
д.т.н., доцент

 Дарьенков А.Б.

Заведующий кафедрой
"Электроэнергетика,
электроснабжение и силовая
электроника" НГТУ, к.т.н., доцент

 Севостьянов А.А.



Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)
111250, г. Москва,
вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1
Тел.: (495) 362-75-60, факс: (495) 362-89-38
E-mail: universe@mpei.ac.ru
http://www.mpei.ru



УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор

В.Н. Замолодчиков

2024 г.

№ _____
« _____ » _____ 2024 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов кандидатской диссертации Кузьмина И.Н.

Результаты диссертационной работы Кузьмина И.Н. «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОТОЧНОГО АККУМУЛЯТОРА» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – электротехнические комплексы и системы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Материалы диссертационной работы используются при чтении лекций по курсам «Устройства силовой электроники», «Средства автоматизированного анализа и управления», «Цифровая обработка сигналов», «Преобразовательные установки», «Моделирование электронных устройств и систем» и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Доцент кафедры ПЭ, к.т.н., доц

 Д.А.Серегин

Заведующий кафедрой ПЭ, д.т.н., доц

 М.Г.Асташев

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

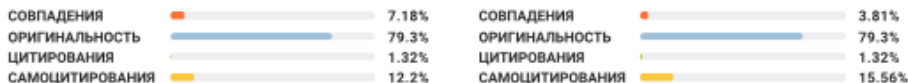
Нижегородский государственный технический университет им.П.Е. Ал

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Кузьмин Иван Николаевич
Самоцитирование
рассчитано для: Кузьмин Иван Николаевич
Название работы: Диссертация Кузьмин
Тип работы: Кандидатская диссертация
Подразделение:

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ



ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 02.02.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 02.02.2024 15:02

Структура документа: Проверенные разделы: приложение с.79-98, 99-101, 112, 139-141, содержание с.2-3, основная часть с.4-69, 98, 101-111, 112-139
Модули поиска: Переводные заимствования*; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Цитирование; eLIBRARY.RU; СМИ России и СНГ*; Диссертации НББ; ИПС Адилет; Перефразирования по коллекции издательства Wiley; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley; Шаблонные фразы; Патенты СССР, РФ, СНГ; Издательство Wiley; Перефразирования по коллекции IEEE; Медицина; Модуль поиска "НГТУ"; Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Кольцо вузов; Библиография; Коллекция НБУ; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Сводная коллекция ЭБС; Переводные заимствования по Интернету (EnRu);

Работу проверил: Липужин Иван Алексеевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.