

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
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) 362-74-57, (495) 362-70-17

УДК 621.472

Per. № НИОКТР 125061907170-1

Per. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

д-р техн. наук, профессор

Н.Д. Рогалев

12.02.2025
М.П. ПРОРЕКТОРА ПО
НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ
ВОЛКОВ А.В.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка теоретических основ построения гибридных систем накопления энергии для автоматизированных гибридных энергетических комплексов
по теме:

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ (промежуточный, этап 1)

Государственное задание FSWF-2025-0003

по теме № 1002250

выполненной кафедрой гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии

Научно-исследовательская лаборатория «Системы управления солнечно-дизельными комплексами»

Руководитель органа информации

С.С. Бондарева

И.о. заведующего кафедрой ГВИЭ
/канд. техн. наук, доцент/

Т.А. Шестопалова

Руководитель НИОКТР
/заведующий лабораторией, канд. техн. наук/

А.Г. Васьков

Ответственный исполнитель
/ст. науч. сотр., канд. техн. наук/


П.С. Шуркалов

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИОКТР


Заведующий лабораторией,
канд. техн. наук

 26.12.25
(подпись, дата)

А.Г. Васьков
(введение, разделы
2, 3, 5, заключение)

Отв. исполнитель

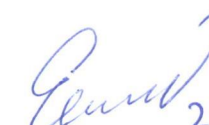
Старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

 26.12.25
(подпись, дата)

П.С. Шуркалов
(подраздел 1.3)


Исполнители:

Ведущий инженер

 26.12.25
(подпись, дата)


Е.Л. Шуверов
(раздел 4,
подраздел 5.5,
приложение В)

Инженер-исследователь

 26.12.25
(подпись, дата)


К.А. Андреева
(подраздел 1.1,
приложение А)

Инженер-исследователь

 26.12.25
(подпись, дата)

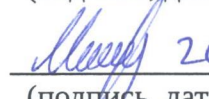
А.А. Васильева
(подраздел 1.2,
приложение А)

Инженер-исследователь

 26.12.25
(подпись, дата)


О.В. Кофанова
(подраздел 1.4)

Инженер-исследователь

 26.12.25
(подпись, дата)


А.С. Мишин
(подразделы 1.4, 5.2,
приложение В)

Инженер-исследователь

 26.12.25
(подпись, дата)

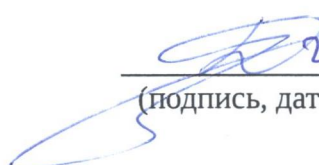
Д.А. Мочалов
(подраздел 1.4,
приложение Б)

Инженер-исследователь

 26.12.25
(подпись, дата)

И.Ф. Пономарев
(подраздел 4.3,
приложение В)

Инженер-исследователь

 26.12.25
(подпись, дата)

Д.Д. Субботина
(подраздел 1.2)

Инженер-исследователь

В.Ю. Харитонов 26.12.25
(подпись, дата)

В.Ю. Харитонов
(подраздел 4.3,
приложение В)

Инженер

С.А. Дмитриев 26.12.25
(подпись, дата)

С.А. Дмитриев
(раздел 3,
подраздел 4.2,
приложение Е)

Инженер

П.П. Клишин 26.12.25
(подпись, дата)

П.П. Клишин
(раздел 3,
подраздел 4.1,
приложение Ж)

Техник

М.А. Ульшин 26.12.25
(подпись, дата)

М.А. Ульшин
(приложения В, Г)

Нормоконтроль

А.Г. Васьков 26.12.25
(подпись, дата)

А.Г. Васьков

РЕФЕРАТ

Отчет 408 с., 1 кн., 89 рис., 64 табл., 204 источн., 7 прил.

СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, РЕЗКОПЕРЕМЕННАЯ НАГРУЗКА, СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, ОПТИМИЗАЦИЯ, СТРУКТУРА, ПАРАМЕТРЫ

Объектом исследования являются системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), способные эффективно работать при резкопеременной нагрузке.

Цель работы – создание экспериментального образца гибридной СНЭЭ, позволяющей проводить исследования возможности повышения эксплуатационных характеристик автоматизированных гибридных энергетических комплексов, благодаря использованию в составе СНЭЭ суперконденсаторов.

Результатами этапа 1 НИОКР являются:

- 1) аналитический обзор существующих подходов к построению гибридных СНЭЭ для автоматизированных гибридных энергетических комплексов (АГЭК);
- 2) техническое задание на изготовление экспериментального образца гибридной СНЭЭ с учетом возможности проведения испытаний в условиях резкопеременных нагрузок;
- 3) эскизная документация на экспериментальный образец гибридной СНЭЭ;
- 4) экспериментальный образец гибридной СНЭЭ, позволяющий исследовать влияние электрохимических аккумуляторов и суперконденсаторов на режимы работы АГЭК в переходных процессах;
- 5) методика испытаний экспериментального образца гибридной СНЭЭ;
- 6) результаты будут быть использованы в следующих этапах НИОКР для валидации математической модели гибридной СНЭЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 Аналитический обзор существующих подходов к построению гибридных СНЭ для автоматизированных гибридных энергетических комплексов.....	13
1.1 Реализованные и планируемые проекты СДК.....	13
1.1.1 Общие положения.....	13
1.1.2 Обзор реализованных объектов.....	14
1.1.3 Состав и параметры солнечно-дизельных комплексов.....	15
1.1.4 Солнечная генерация.....	15
1.1.5 Дизельная генерация.....	18
1.1.6 Системы накопления энергии.....	19
1.1.7 Управление нагрузкой и качество электроснабжения.....	19
1.1.8 Инверторные системы и управление.....	20
1.1.9 Теплоснабжение и котельные.....	21
1.2 Особенности функционирования инверторного оборудования СДК.....	22
1.2.1 Общие положения.....	22
1.2.2 Системы бесперебойного питания.....	47
1.2.3 Инверторы напряжением до 1 кВ и номинальными токами на выходе до 10 кА.....	49
1.2.4 Инверторы полупроводниковые мощностью до 5 кВА.....	50
1.2.5 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые мощностью 5 кВА и выше.....	52
1.2.6 Параметры современных инверторов.....	52
1.2.7 Заключительные положения.....	54
1.3 Применение суперконденсаторов.....	57
1.3.1 Общие положения.....	57
1.3.2 Конденсаторы и суперконденсаторы.....	60
1.3.3 Моделирование EDLC-конденсаторов.....	75
1.3.4 Сферы использования суперконденсаторов.....	78
1.3.5 Роль суперконденсаторов в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии.....	79
1.3.6 Схемы включения суперконденсаторов в энергетические системы.....	80
1.3.7 Пассивная схема.....	81

1.3.8 Полуактивная схема.....	83
1.3.9 Активная схема.....	83
1.4 Предварительное математическое моделирование.....	83
1.4.1 Моделирование резкопеременной нагрузки.....	83
1.4.2 Моделирование систем накопления энергии с суперконденсаторами.....	91
2 Техническое задание на изготовление экспериментального образца гибридной системы накопления энергии с учетом возможности проведения испытаний в условиях резкопеременных нагрузок.....	102
2.1 Общие положения.....	102
2.2 Техническое задание на изготовление экспериментального образца гибридной системы накопления энергии.....	103
2.2.1 Общие сведения.....	103
2.2.2 Цель и назначение.....	103
2.2.3 Технические требования.....	103
2.2.4 Этапы разработки.....	106
2.2.5 Методы испытаний.....	106
2.2.6 Требования к документации.....	107
2.2.7 Порядок приемки.....	107
3 Эскизная документация на экспериментальный образец гибридной СНЭ.....	109
3.1 Общие положения.....	109
3.2 Описание существующего макета СДК.....	109
3.2.1 Состав и краткое описание оборудование макета.....	112
3.3 3-D моделирование размещения оборудования.....	115
3.4 Принципиальные электрические схемы.....	118
4 Экспериментальный образец гибридной СНЭ, позволяющий исследовать влияние электрохимических аккумуляторов и суперконденсаторов на режимы работы АГЭК в переходных процессах.....	121
4.1 Линейные схемы.....	121
4.1.1 Состав оборудования СДК.....	121
4.1.2 Логическая структура и пути прохождения энергии.....	126
4.1.3 Основные режимы работы.....	127
4.1.4 Защита и коммутационная аппаратура.....	128
4.1.5 Итоговое назначение моделируемой системы в составе полигона.....	129

4.2 Система измерения электрических величин.....	130
4.3 Система мониторинга испытательного стенда «Гибридная СНЭ».....	132
4.3.1 Общие положения.....	132
4.3.2 Подсистема мониторинга и управления имитаторами нагрузки.....	132
4.3.3 Подсистема мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции.....	140
4.3.4 Подсистема мониторинга батарейных инверторов.....	149
4.3.5 Подсистема мониторинга солнечного инвертора.....	156
4.3.6 Дополнительные компоненты.....	162
5 Методика испытаний экспериментального образца гибридной СНЭ.....	166
5.1 Методика испытаний.....	166
5.1.1 Общие положения.....	166
5.1.2 Испытательное оборудование.....	166
5.1.3 Нормативная база.....	168
5.2 Этапы проведения испытаний.....	168
5.2.1 Подготовительный этап.....	168
5.2.2 Испытание для определения работоспособности системы мониторинга макета гибридной СНЭ.....	168
5.2.3 Испытание для определения фактической энергоемкости.....	169
5.2.4 Испытание для определения диаграммы мощности.....	169
5.2.5 Испытание для определения эффективности заряда-разряда.....	170
5.2.6 Измерение времени отклика и скорости изменения выходной мощности.....	170
5.2.7 Испытание для определения саморазряда.....	172
5.2.8 Испытания для определения рабочих характеристик СНЭ.....	172
5.2.9 Испытание по работе в динамических режимах.....	173
5.2.10 Испытание по определению параметров схемы замещения суперконденсаторного модуля.....	173
5.3 Пример таблиц протокола проведения испытаний.....	181
5.4 Критерии успешности испытаний.....	185
6 Предварительные испытания испытательного стенда «Гибридная СНЭ».....	186
6.1 Испытания по моделированию резкопеременной нагрузки.....	186
6.2 Испытания гибридной СНЭ на нагрузку.....	188
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	191

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ А Статистическая информация.....	205
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Моделирование резкопеременной нагрузки.....	295
ПРИЛОЖЕНИЕ В Эскизная документация на гибридную систему накопления энергии. 300	
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Программный код компонентов системы мониторинга и управления испытательного стенда «Гибридная СНЭ».....	309
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Протоколы испытаний.....	379
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Результирующие показатели выполнения работ.....	390
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Подготовленные в рамках выполнения НИОКР публикации.....	391

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

АГЭК	– автоматизированный гибридный энергокомплекс
АД	– асинхронный двигатель
АИН	– автономный инвертор напряжения
АКБ	– аккумуляторная батарея
АРВ	– автоматический регулятор возбуждения
АРС	– автоматический регулятор скорости
АРЧ	– автоматический регулятор частоты
АСУ	– автоматизированная система управления
БД	– база данных
ВАХ	– вольтамперная характеристика
ВИЭ	– возобновляемые источники энергии
ГАНЭ	– гидроаккумулирующий накопитель энергии
ГНЭ	– гравитационный накопитель энергии
ДГУ	– дизель-генераторная установка
ДИСТ	– дистанционное управление
ДОП	– дистанционное управление с использованием дополнительного оборудования
ДСК	– двойнослойный конденсатор
ДЭС	– дизельная электростанция
ИНС	– искусственная нейронная сеть
КЗ	– короткое замыкание
КНЭ	– кинетический накопитель энергии
КПД	– коэффициент полезного действия
ЛЭП	– линия электропередачи
МЕСТ	– местное управление
НЭА	– электрохимическая аккумуляторная батарея
ПЛК	– программируемый логический контроллер
ПМИ	– программа и методика испытаний
ПНЭ	– электрохимическая проточная батарея
СВНЭ	– накопитель энергии со сжатым воздухом
СДК	– солнечно-дизельный комплекс
СК	– суперконденсатор
СКМ	– суперконденсаторный модуль
СНЭ	– система накопления энергии

СНЭЭ	– система накопления электроэнергии
СПГ	– синтезированный природный газ
СПИНЭ	– сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии
СЭС	– солнечная электростанция
ТУ	– технические условия
ФЭМ	– фотоэлектрический модуль
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ЩБП	– щит бесперебойного питания/распределительный блок
ЩВР	– щит вводной-распределительный
ЩПТ	– щит постоянного тока
ЩУР	– шкаф управления и распределения
ЭДС	– электродвижущая сила
АС	– переменный ток (Alternating Current)
АІ	– аналоговый вход (Analog Input)
CAES	– накопитель энергии со сжатым воздухом (Compressed Air Energy Storage)
DC	– постоянный ток (Direct Current)
DI	– дискретный вход (Digital Input)
DLC	– двойнослойный конденсатор (Double-Layer Capacitor)
EDLC	– электрический двухслойный конденсатор (Electric Double-Layer Capacitor)
ESR	– внутреннее сопротивление суперконденсатора (Equivalent Series Resistance)
ESS	– система накопления энергии (Energy Storage System)
FAI	– быстрый аналоговый вход (Fast Analog Input)
FDI	– быстрый дискретный вход (Fast Digital Input)
HESS	– гибридная система накопления энергии (Hybrid Energy Storage System)
IGBT	– биполярно-полевой транзистор (Integrated Gate Commutated Thyristor)
IGCT	– запираемый тиристор (Integrated Gate Commutated Thyristor)
IEA	– Международное энергетическое агентство (International Energy Agency)
LAN	– локальная вычислительная сеть (Local Area Network)
MOSFET	– полевой транзистор (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
MPWM	– множественная широтно-импульсная модуляция (Multiple Pulse Width Modulation)

MSPWM	– модифицированная синусоидальная широтно-импульсная модуляция (Modified Sinusoidal Pulse Width Modulation)
NREL	– Национальная лаборатория возобновляемой энергетики (National Renewable Energy Laboratory)
SC	– суперконденсатор (Supercapacitor)
SOC	– степень заряда накопителя (State of Charge)
SMES	– сверхпроводящий магнитный накопитель энергии (Superconducting Magnetic Energy Storage)
SPWM	– синусоидальная широтно-импульсная модуляция (Sinusoidal Pulse Width Modulation)

ВВЕДЕНИЕ

В условиях активного развития распределенной энергетики и роста доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) особую актуальность приобретает задача повышения надежности и эффективности автономных и локальных энергетических систем. Существенная часть удаленных и труднодоступных территорий Российской Федерации по-прежнему обеспечивается электроэнергией за счет дизельных электростанций, эксплуатация которых характеризуется высокой стоимостью топлива, значительными выбросами загрязняющих веществ и ограниченными возможностями регулирования режимов работы. Одним из перспективных направлений модернизации таких систем является внедрение автоматизированных гибридных энергетических комплексов, в том числе солнечно-дизельных комплексов (СДК), оснащенных системами накопления энергии (СНЭ).

Использование систем накопления энергии позволяет сглаживать колебания мощности, повышать топливную эффективность дизель-генераторных установок, увеличивать долю ВИЭ в энергобалансе и улучшать динамические характеристики энергокомплекса в целом. Наибольший интерес представляют гибридные системы накопления энергии, сочетающие электрохимические аккумуляторы и суперконденсаторы, что обеспечивает одновременную реализацию высокой энергоемкости и высокой удельной мощности.

Настоящая научно-исследовательская работа направлена на разработку теоретических основ построения гибридных систем накопления энергии для автоматизированных гибридных энергетических комплексов, а также на создание и экспериментальное исследование макета гибридной системы накопления энергии. В рамках первого этапа НИР выполнен аналитический обзор существующих технических решений, разработана структура экспериментального образца гибридной СНЭ, создан испытательный стенд и проведены предварительные испытания, подтверждающие работоспособность и заявленные характеристики системы.

1 Аналитический обзор существующих подходов к построению гибридных СНЭ для автоматизированных гибридных энергетических комплексов

1.1 Реализованные и планируемые проекты СДК

1.1.1 Общие положения

В настоящее время на территории России по-прежнему сохраняется значительное количество населенных пунктов, не подключенных к единой энергосистеме. Электроснабжение таких районов осуществляется автономно, преимущественно за счет дизельных электростанций. Однако подобная система имеет ряд существенных недостатков – высокая стоимость и сложность доставки топлива в труднодоступные регионы, а также моральное и физическое устаревание энергетического оборудования создают серьезную нагрузку на региональные бюджеты и окружающую среду [1,2].

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к внедрению дополнительной генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в автономных энергокомплексах. По данным экспертов форума RENWEX 2023, строительство гибридных электростанций ведется в 40 населенных пунктах на территории Сибири и Дальнего Востока с суммарной установленной мощностью более 60 МВт. Интеграция солнечной и ветровой генерации с традиционными дизельными станциями позволяет значительно снизить затраты на топливо, повысить надежность электроснабжения и уменьшить экологическую нагрузку [1].

Передовым регионом в развитии гибридных энергетических систем является Республика Саха (Якутия), где активно реализуются проекты по интеграции возобновляемых источников энергии с традиционными дизельными станциями. В соответствии с соглашением, подписанным в 2020 году между правительством Якутии и ПАО «РусГидро», запланирована модернизация 72 дизельных электростанций в 19 муниципальных районах. В 2024 году в республике введено в эксплуатацию 12 автоматизированных гибридных энергокомплексов (АГЭК), обеспечивающих снижение расходов дизельного топлива до 30-50 % в зависимости от сезона. Проекты реализуются с применением современных технологий, включающих солнечные электростанции, системы накопления энергии и автоматизированные системы управления [3,4].

Данный раздел представляет аналитический обзор реализованных проектов солнечно-дизельных комплексов в Якутии, содержит детальную характеристику комплексов, анализирует их технические особенности, эксплуатационные результаты и

выявляет ключевые вызовы, особенно в контексте взаимодействия с резкопеременными нагрузками теплоинфраструктуры.

Настоящий обзор основывается на комплексном анализе информации, полученной из официальных источников компаний, реализующих проекты по модернизации энергетической инфраструктуры удаленных населенных пунктов [5–16]. К ним относятся технические описания и презентации проектов ПАО «РусГидро», ООО «Группа ЭНЭЛТ», АО «Теплоэнергосервис» (годовой отчет за 2023 год), а также материалы региональных операторов электроэнергетики и ООО «РАО ЭЭС». Дополнительно были проанализированы документы, размещенные на государственных ресурсах по закупкам и тендерам (портал РосТендер, база CNTD.RU и нормативная база), которые содержат детальные технические спецификации оборудования, сметы и графики реализации проектов. В исследовании также учтены официальные новостные материалы от региональных информационных агентств (ГТРК Саха, 1sn.ru, ПримаМедиа, Труд Востока) и специализированные базы данных по энергетическому оборудованию (Атлас КМНС), фиксирующие актуальное состояние энергоснабжения в удаленных районах Якутии и Дальнего Востока. Такой комплексный подход обеспечивает высокую достоверность представляемых данных и позволяет отследить современные тенденции в развитии гибридных энергокомплексов в России.

1.1.2 Обзор реализованных объектов

На территории Республики Якутия на данный момент реализовано более 25 проектов солнечно-дизельных комплексов. Наибольшая концентрация проектов расположена в восточной части республики, в Момском, Оймяконском, Верхоянском и Дулдумском районах. Среди всех реализованных объектов были рассмотрены комплексы с установленной мощностью солнечных электростанций от 10 кВт (село Столбы) до 1,5 МВт (село Хонуу).

Реализованные СДК расположены в разнообразных по размеру поселениях, от малых (Тойон-Ары, 116 человек) до крупных административных центров (Батагай и Бетенкес, по 3759 человек). Анализ демографического распределения выявляет четыре категории поселений:

1) микропоселения (менее 300 человек) включают 8 поселений со средним населением 219 человек. Эти поселения требуют относительно скромных энергетических мощностей: средняя мощность СЭС составляет 48 кВт, а ДЭС – 382 кВт;

2) малые поселения (300-700 человек) представляют собой 9 поселений, включая Сасыр, Кулун-Елбют и Урицкое. Среднее население этой группы – 481 человек, при этом установленная мощность возрастает до среднего значения 101 кВт для СЭС и 838 кВт для ДЭС;

3) средние поселения (700-1000 человек) включают три поселения (Верхоянск, Оймякон, Саньяхта) со средним населением 817 человек. Эта категория характеризуется существенным скачком в установленных мощностях: среднее значение СЭС составляет 543 кВт, ДЭС – 1053 кВт;

4) крупные поселения (более 1000 человек) включают четыре поселения, в том числе два крупнейших административных центра Батагай и Бетенкес. Среднее население этой группы достигает 2680 человек, при этом средняя установленная мощность СЭС составляет 1167 кВт, а ДЭС – 5647 кВт. Батагай, являясь одним из крупнейших поселений, имеет установленную мощность СЭС 1000 кВт и ДЭС 12 120 кВт – наибольшие значения среди всех реализованных комплексов.

1.1.3 Состав и параметры солнечно-дизельных комплексов

Таблица 1.1 показывает, что во всех рассматриваемых населенных пунктах применяются гибридные схемы СЭС + ДЭС, а в большинстве также внедрены системы накопления энергии на литий-ионных (LiFePO_4) или свинцово-кислотных аккумуляторах. Так, например, в Хонуу установлена СЭС мощностью 1,5 МВт с ДЭС 3,3 МВт и СНЭ 630 кВт, в Верхоянске СЭС 1 МВт совмещена с ДЭС 2,3 МВт и СНЭ 300 кВт, а в Сасыре используются СЭС 233 кВт, ДЭС 600 кВт и СНЭ 125 кВт. Практически во всех населенных пунктах есть информация о наличии крупного потребителя в виде котельной, котлы и насосы, которой могут значительно сказываться на работе СДК, так как создают резкопеременную нагрузку.

1.1.4 Солнечная генерация

Солнечная энергетика является основным компонентом гибридных систем, ориентированным на снижение зависимости от дизельного топлива и сокращение эксплуатационных затрат. Общая установленная мощность рассмотренных проектов достигает 5468 кВт.

Масштабирование мощностей демонстрирует практический подход к проектированию. Наиболее крупные станции установлены в центральных поселениях: Хонуу (1500 кВт), Верхоянск (1030 кВт) и Батагай (1000 кВт). Средняя мощность солнечной станции по всем проектам составляет 279 кВт, однако распределение носит

асимметричный характер, что можно увидеть на рисунке 1.1. Микророселения получают станции мощностью 10-50 кВт, что достаточно для обеспечения базовых потребностей при низких солнечных ресурсах в высоких широтах.

Таблица 1.1 – Основная информация по существующим СДК

Размер поселения	Населенный пункт	Численность населения, чел.	Мощность СЭС, кВт	Мощность ДЭС, кВт	Мощность СНЭ, кВт	Наличие крупного потребителя в виде котельной
Микророселения	Кулун-Елбют	226	103	250	60	+
	Тебюлях (Чумпу-Кытыл)	214	100	250	60	+
	Урицкое	246	50	350	50	+
	Батамай	210	60	160	н/д	+
	Дулгалах	281	30	560	н/д	- (есть в планах)
	Куду-Кюель	220	20	327	н/д	н/д
	Тойон-Ары	116	20	560	н/д	+
	Джаргалах	237	15	530	н/д	+
Малые поселения	Сасыр	687	233	600	125	+
	Орто-Балаган	414	50	590	100	+
	Оймякон	560	231	1000	150	+
	Дабан	313	66	600	100	+
	Саныхтах	544	198	1610	150	+
	Ючюгей	374	30	550	н/д	+
	Куберганя	479	20	670	н/д	+
	Эйик	336	40	775	н/д	+
	Бетенкес	619	40	1145	н/д	+
Средние поселения	Табалах (Улахан-Кюель)	776	400	600	125	+
	Верхоянск	745	1030	2470	300	+
	Тополиное	929	198	1845	250	+

Продолжение таблицы 1.1

Размер поселения	Населенный пункт	Численность населения, чел.	Мощность СЭС, кВт	Мощность ДЭС, кВт	Мощность СНЭ, кВт	Наличие крупного потребителя в виде котельной
Крупные поселения	Батагай	3759	1000	12120	н/д	+
	Столбы	1053	10	520	н/д	+
	Юнкюр	1032	40	650	н/д	н/д
	Мома (Хонуу)	2052	1500	3300	630	+

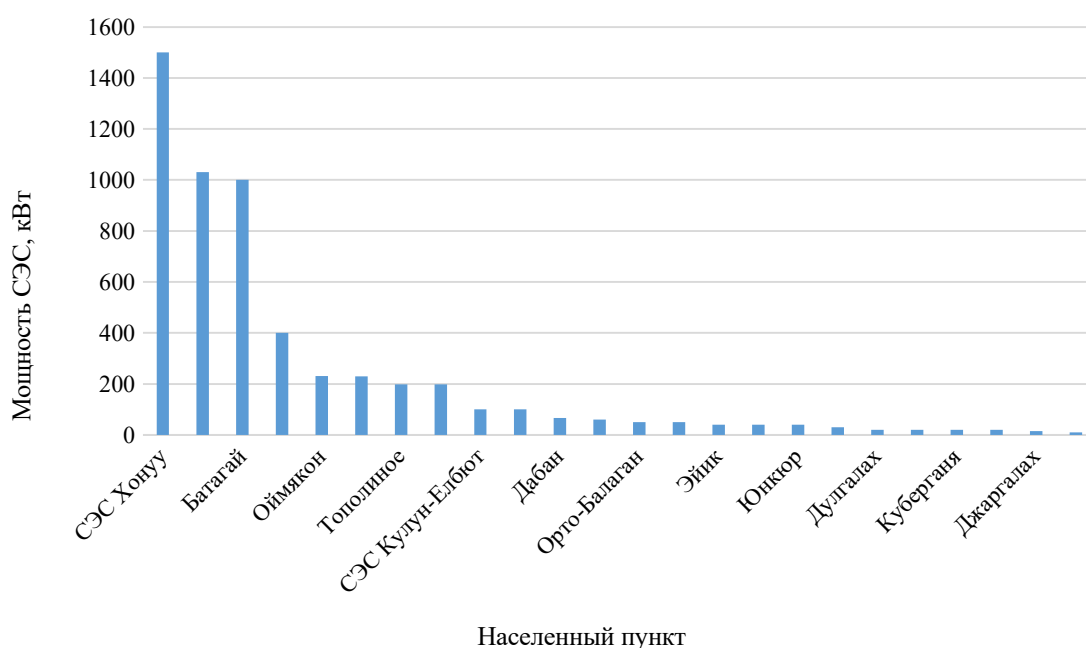


Рисунок 1.1 – Установленная мощность солнечных электростанций в реализованных СДК

Анализ оборудования, установленного в различных комплексах, выявляет применение современных технологий. В Хонуу установлены высокоэффективные модули HVL-395/HJT производства с технологией гетероперехода. В других поселениях используются двухсторонние монокристаллические панели (Табалах, серия LR5-72HBD), обеспечивающие повышенный выход энергии за счет отражения света от земной поверхности. Количество панелей варьируется от 10 единиц в малых комплексах до 3472 единиц в Батагае, что отражает различия в масштабах проектов.

Доля солнечной генерации в общей установленной мощности составляет в среднем 15,1 % по всем комплексам. Однако распределение по поселениям демонстрирует значительную вариацию – рисунок 1.2.

Поселения с высокой долей СЭС (> 20 %):

- Хонуу – 25,9 %,
- Сасыр – 27,7 %,
- Кулун-Елбют и Чумпу-Кытыл – 28,6 %,
- Верхоянск – 29,4 %,
- Табалах – 40 %.

Эти поселения представляют наиболее прогрессивный подход к гибридизации энергосистем, где установленная мощность возобновляемых источников достигает или превышает мощность традиционной генерации.

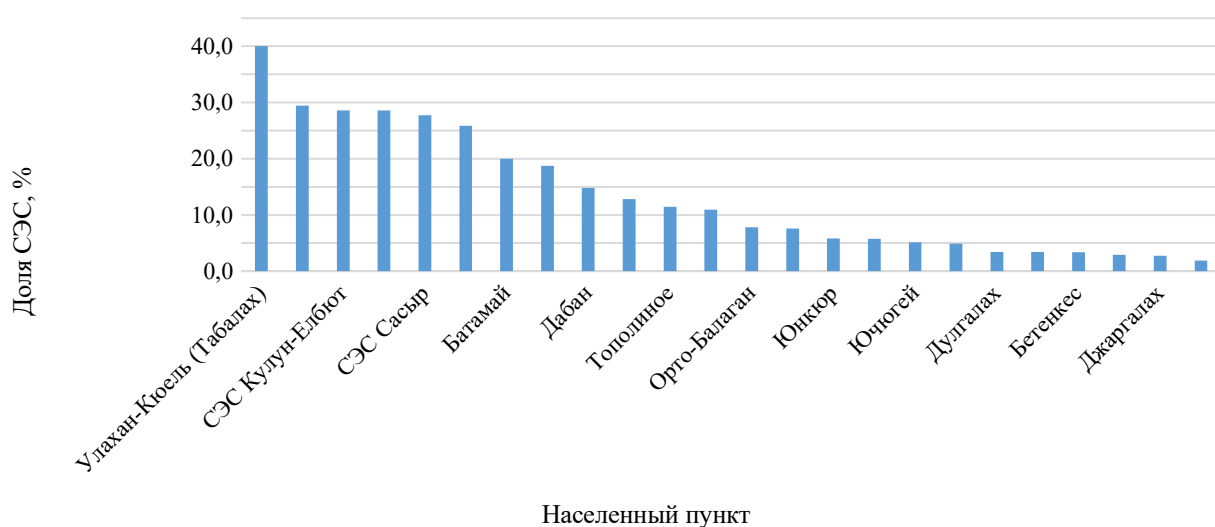


Рисунок 1.2 – Доля солнечной генерации в составе гибридных комплексов

Поселения со средней долей СЭС (10-20 %) включают шесть комплексов, в том числе Батамай (20,0 %), Оймякон (18,8 %) и Саныяхтах (11,0 %).

Поселения с низкой долей СЭС (< 10 %) составляют половину (12 поселений), где солнечные генераторы чаще всего ставились как экспериментальные станции, а на данный момент играют вспомогательную роль, обеспечивая в среднем 4,6 % генерируемой энергии.

1.1.5 Дизельная генерация

Несмотря на приоритизацию возобновляемых источников, дизельная генерация остается основным и наиболее надежным источником электроэнергии во всех реализованных комплексах. Общая установленная мощность всех дизельных генераторов достигает 32567 кВт, что в 5,9 раза превышает мощность солнечных станций. Это

соотношение отражает реальные условия функционирования энергосистем в высоких широтах, где солнечная радиация ограничена сезонными и суточными вариациями.

Каждая дизельная станция состоит из 3-7 генераторов переменной мощности, что позволяет оптимизировать режимы работы. Например, комплекс Хонуу включает семь генераторов мощностью 1000 и 550 кВт, что обеспечивает гибкость при варьировании нагрузки. Комплекс Батагая, будучи крупнейшим, включает 12 генераторов с общей номинальной мощностью 12 120 кВт.

Удельный расход условного топлива (г.у.т./кВт·ч) варьируется в диапазоне 345,7-537,8 г.у.т./кВт·ч, что отражает различия в эффективности оборудования и режимах нагрузки. Наиболее эффективно работают станции в Дабане (345,7 г.у.т./кВт·ч) и Орто-Балагане (352 г.у.т./кВт·ч), в то время как менее эффективные комплексы (Кулун-Елбют, 508,5 г.у.т./кВт·ч; Уriskое, 509 г.у.т./кВт·ч) могут требовать модернизации.

1.1.6 Системы накопления энергии

По имеющимся данным из открытых источников системы накопления энергии (СНЭ) установлены как минимум в 13 из 24 поселений (54,2 %). Общая емкость всех установленных систем накопления достигает 2621,4 кВт·ч. Распределение по поселениям сильно асимметрично: пять поселений (Хонуу, Тополиное, Саняхтах, Оймякон, Орто-Балаган) содержат 91 % всей емкости, в то время как остальные восемь поселений с СНЭ содержат только 9 %.

Хонуу, с максимальной емкостью 550 кВт·ч, демонстрирует приоритизацию в крупных административных центрах. Тополиное, несмотря на меньшее население (929 человек), получило емкость 345,6 кВт·ч, что может быть связано с наличием энергоемких потребителей (котельная, промышленные объекты).

Анализ документаций проектов выявляет использование литий-ионных батарей серии LiFePO₄ (Табалах, Урицкое), свинцово-кислотных аккумуляторов типа OPzV (Дулгалах) и специализированных накопителей.

Системы накопления энергии, несмотря на ограниченную емкость, выполняют критическую роль в поглощении скачков нагрузки, вызванных включением мощного оборудования. Это снижает нагрузку на дизельные генераторы, продлевая их срок службы и улучшая качество напряжения в сети.

1.1.7 Управление нагрузкой и качество электроснабжения

Анализ неравномерности нагрузки выявляет критические вызовы, стоящие перед инженерами. Коэффициент неравномерности (отношение максимальной нагрузки к

минимальной) варьируется от значений менее 10 в большей части поселений до экстремальных значений, достигающих 30, в нескольких комплексах. Более подробно можно посмотреть на рисунке 1.3.

Эти экстремальные значения указывают на выраженные пиковые нагрузки, вызванные включением мощного оборудования (котельные, насосы, компрессоры). Средний коэффициент неравномерности по всем поселениям составляет 9,59 о.е.

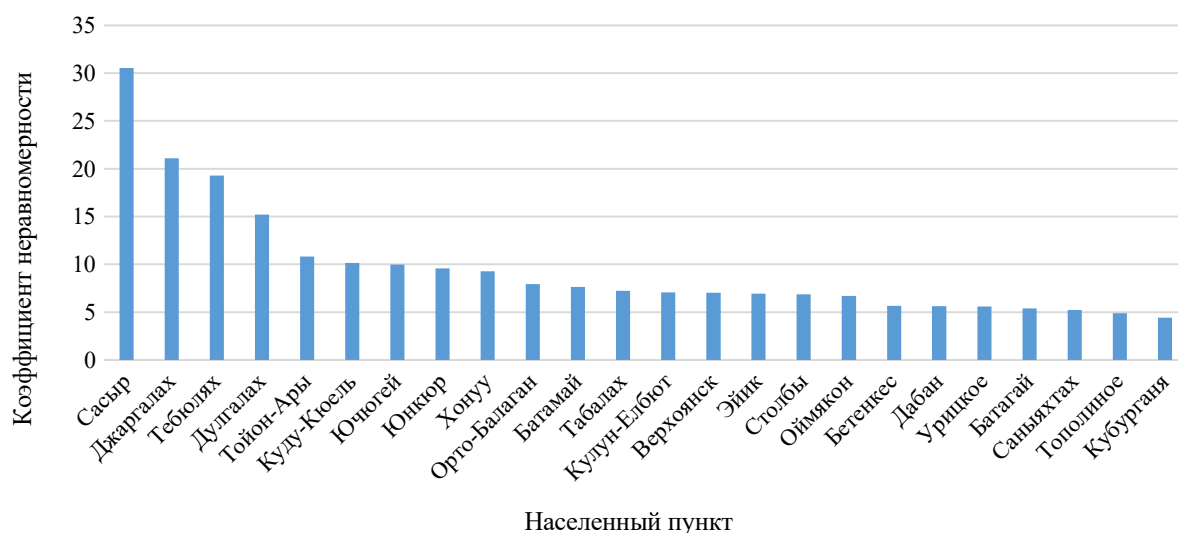


Рисунок 1.3 – Коэффициент неравномерности нагрузки в СДК Якутии

Анализируя графики нагрузки, можно также выявить явную сезонность. В большинстве населенных пунктах нагрузка значительно возрастает в сентябре и снижается в июне. Таким образом можно заключить, что отопительных сезон в данном регионе длится 9 месяцев (с сентября по май).

В летний период высокая солнечная радиация обеспечивает максимальную генерацию, что снижает нагрузку на дизельные генераторы. Системы накопления заряжаются от избыточной энергии, подготавливая ресурсы для зимнего периода, когда потребление тепла (и электроэнергии на котельные) максимально, а солнечная генерация минимальна.

1.1.8 Инверторные системы и управление

Для преобразования постоянного тока от солнечных панелей в переменный ток и управления гибридными системами используются инверторы различных производителей и типов.

Сетевые инверторы (для подключения солнечных панелей к сети):

- серия Sungrow (SG50CX, SG33CX) – наиболее распространенные модели в малых и средних комплексах;
- серия SMA (STP 10000 TL, STP 17000 TL, STP 25000 TL) – используются в крупных комплексах с большой установленной мощностью;
- трехфазные инверторы GW 136K-HT 500 (VAC) – применяются в поселениях с высокими требованиями к стабильности.

Батарейные инверторы (для работы с накопителями):

- SMA Sunny Island серии SL6.0H и SL8.0H – обеспечивают двунаправленное преобразование энергии (зарядка и разрядка) и поддержку режимов изолированной работы.

Количество инверторов зависит от масштаба комплекса: в Хонуу установлено 13-14 сетевых инверторов, в меньших комплексах – от 1 до 7 единиц.

1.1.9 Теплоснабжение и котельные

Основная электрическая нагрузка рассматриваемых населенных пунктов – это жилищный фонд и объекты социальной инфраструктуры. Значительная часть электрической нагрузки в большинстве поселений приходится на системы центрального теплоснабжения. Котельные, обслуживающие жилой фонд и социальную инфраструктуру, потребляют электроэнергию в режиме переменной и резкопеременной нагрузки, вызванной работой циркуляционных и сетевых насосов.

Анализ технической документации выявляет использование насосов WILO (серии IL, TOP-S) и других производителей, обеспечивающих циркуляцию теплоносителя. Котельные оснащены системами управления, включая дымососы, вентиляторы дутьевые, циклоны для отделения золы и приборы контроля качества воды.

Установленная мощность отдельных котельных варьируется от 0,35 МВт в малых поселениях до 8 МВт в Тополином. Несколько крупных поселений имеют несколько котельных, работающих параллельно, что обеспечивает надежность и возможность проведения технического обслуживания.

Реализованные СДК обеспечивают надежное электроснабжение людей, проживающих в отдаленных регионах Якутии. Однако проблема резкопеременной нагрузки остается наиболее сложным аспектом функционирования этих систем.

1.2 Особенности функционирования инверторного оборудования СДК

1.2.1 Общие положения

Согласно ГОСТ 23414-84 [1], «инвертор – это полупроводниковый преобразователь электроэнергии, предназначенный для преобразования постоянного тока в переменный». В энергетике обычно представляет собой источник напряжения с выходной формой, приближенной к синусоиде. Инверторы напряжения могут применяться в виде отдельного устройства или входить в состав источников и систем бесперебойного питания.

Требования к инверторам включают высокие КПД и надежность, а также малые габариты и вес. Кроме того, необходимо, чтобы инвертор выдерживал допустимый уровень высших гармоник в выходном напряжении, и не создавал значительных электромагнитных и радиопомех.

Основным блоком силового инвертора является силовой коммутатор на тиристорах или транзисторах, соединенных по мостовой или другой схеме. Переменное напряжение подается коммутатором на нагрузку за счет изменения полярности подключения. Управление осуществляется микропроцессорной, либо аналоговой схемой. Инвертор может также включать силовой трансформатор, фильтры для подавления гармоник и устройства защиты.

Компоненты инверторов.

В общем случае, инвертор состоит из силовых кремниевых компонентов. Условно эти компоненты можно разделить на две большие группы [18]:

- 1) для преобразования очень больших мощностей (от единиц мегаватт и выше): мощные тиристоры, а также запираемые тиристоры и их модификации,
- 2) для небольших мощностей применяют полевые и биполярно-полевые транзисторы (MOSFET и IGBT).

Приведем нормативные требования, предъявляемые полупроводниковым компонентам (ГОСТ 20859.1-89 (СТ СЭВ 1135-88) [19]). Стандарт распространяется на силовые полупроводниковые приборы общего назначения – диоды, триодные тиристоры, биполярные (в том числе составные) транзисторы, полевые транзисторы и модули всех видов на максимально допустимые средние, действующие, импульсные или постоянные токи 10 А и более, предназначенные для применения в полупроводниковых преобразователях электроэнергии.

Значения максимально допустимого тока (среднего, действующего, импульсного или постоянного) выбирают из ряда: 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80 и 100 А. Для

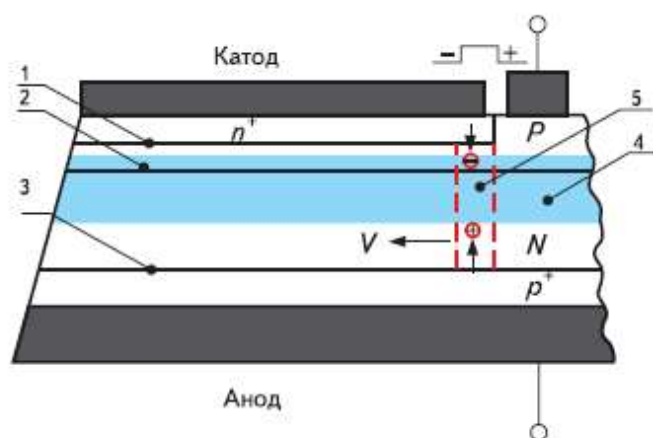
токов более 100 А их значения должны быть установлены умножением соответствующих значений данного ряда на 10 или 100.

Значения критической скорости нарастания тока в открытом состоянии тиристоров в диапазоне от 6,3 до 2500 А/мкс выбирают из ряда: 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000 и 2500 А/мкс.

При применении приборов и модулей необходимо соблюдать требования, указанные в стандарте и технических условиях на приборы и модули конкретных типов. При любых режимах и условиях эксплуатации приборов и модулей не допускается выходить за границы предельно допустимых значений параметров.

Рассмотрим подробнее строение и области применения силовых компонентов.

Тиристор (см. рисунок 1.4) представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру с чередующимися типами проводимости (р-п-р-п), образующую три р-п-перехода. Центральный переход смещен в запиорном направлении и блокирует приложенное напряжение. Высоковольтный тиристор является доминирующим прибором в диапазоне очень больших мощностей.



1, 3 – эмиттерные переходы; 2 – коллекторный переход; 4 – область объемного заряда коллектора; 5 – область первоначального включения

Рисунок 1.4 – Мощный высоковольтный тиристор

Переключение тиристора осуществляется коротким импульсом тока в цепи база-катод, сопровождающийся инжекцией электронов в р-базу и запускающий процесс переключения в узкой области (сотни микрон) вдоль границы база-коллектор, который затем медленно распространяется по всей площади. Основной недостаток классического

тиристора – невозможность выключения импульсом обратного тока в управляющей цепи. Поэтому для закрытия необходимо на время прерывать ток в силовой цепи. Это ограничило его применение областью очень больших мощностей, где критичны малое остаточное напряжение при большой плотности прямого тока и высоком рабочем напряжении, высокая перегрузочная способность и относительно низкая стоимость.

Основные области применения высоковольтных тириستоров сверхмощные преобразователи в линиях электропередач (ЛЭП) постоянного тока, вставки постоянного тока между энергосистемами, статические компенсаторы реактивной мощности в ЛЭП переменного тока и другие мощные устройства.

В диапазоне мощностей от единиц до десятков мегаватт доминирующим прибором является запираемый тиристор (Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT). его конструкция позволяет выключать прибор импульсом управляющего тока. Ключевым условием работы запираемого тиристора является строгая синхронность выключения всех эмиттерных полос, из которых состоит прибор, поскольку рассогласование приводит к локализации тока и разрушению прибора. В современных приборах это обеспечивается схемой «жесткого» выключения с импульсом тока, соизмеримым с силовым током, и временем нарастания в доли микросекунды.

Биполярные транзисторы имеют 3 ячейки полупроводников и 2 р-п-перехода. Как и для тириستоров, для управления используется входной сигнал. При этом транзисторы также способны закрываться по команде управляющего сигнала. Доминирующим прибором в диапазоне мощностей ниже единиц мегаватт и частот от десятков герц до десятков килогерц является биполярно-полевой транзистор (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT). Элементарная ячейка интегральной схемы транзистора (рисунок 1.5) состоит из высоковольтного $p^+N^+N^-p^+$ -биполярного транзистора, в цепь управления которой включен N^+pN^- полевой транзистор с инверсионным каналом. Ключевые преимущества IGBT – малая мощность управления и высокое быстродействие. К недостаткам относятся повышенное остаточное напряжение во включенном состоянии, сложность сборки чипов в корпус и высокая технологическая сложность производства.

В преобразователях малой мощности доминируют мощные полевые транзисторы (MOSFET), работающие при напряжениях до 500 В, токах до сотен ампер и частотах до сотен мегагерц.

Рассмотрим сходства и различия двух видов транзисторов: в общем случае зоны использования IGBT и MOSFET транзисторов представлены ниже (рисунок 1.6) [20].

MOSFET, как и IGBT управляется напряжением. MOSFET имеет положительный температурный коэффициент (т.е. с ростом температуры его сопротивление увеличивается). Он характеризуется крайне низким сопротивлением в открытом состоянии (менее 0,1 мОм), что обуславливает малые статические потери. Также MOSFET содержит встроенный обратный диод, и не имеет токовый «хвост». IGBT сочетает в себе высокие нагрузочные характеристики и простоту управления, однако он имеет сравнительно большой токовый «хвост» и не имеет встроенный обратный диод.

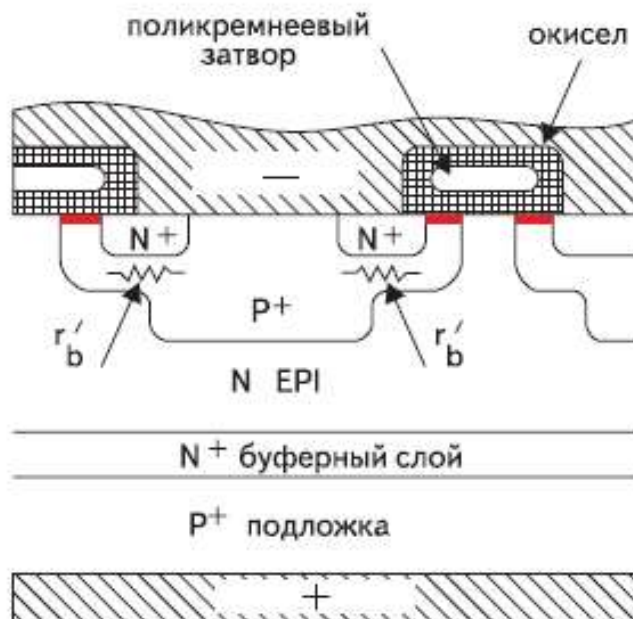


Рисунок 1.5 – Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

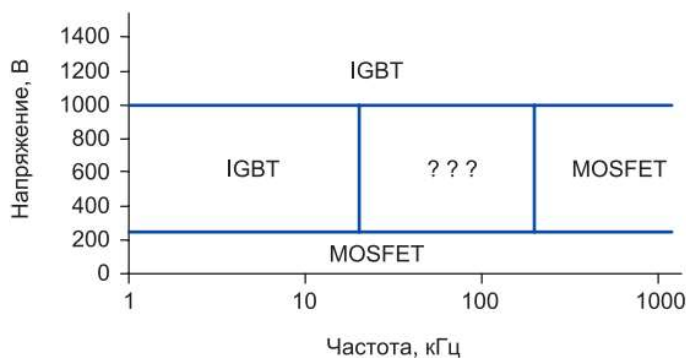


Рисунок 1.6 – Области применения разных типов транзисторов без учета выходной мощности

если в процессе работы преобразователя величина приложенного к транзистору напряжения превысит предельно допустимый уровень $U_{\text{бл.пр}}$ (рисунок 1.7), то транзистор

будет пробит. Специфической особенностью силовых транзисторов, предназначенных для работы в инверторных преобразователях, является наличие обратного диода, встроенного в корпус транзистора или подключенного извне. Поэтому рабочая ветвь вольтамперной характеристики транзистора (ВАХ) имеет односторонний характер.

Принцип работы инвертора.

На рисунке 1.8 приведен пример схемы автономного инвертора напряжения (АИН) на тиристорах [21].

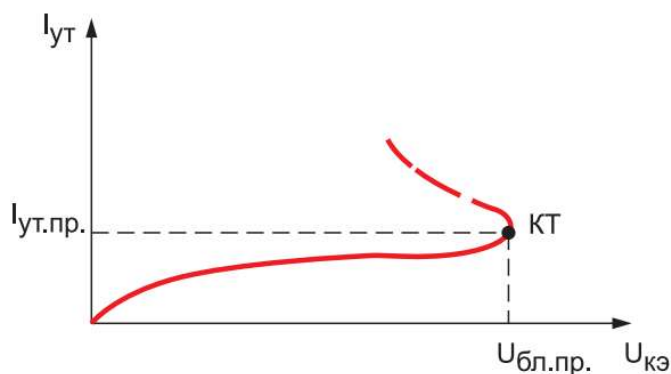


Рисунок 1.7 – Типичная ВАХ IGBT

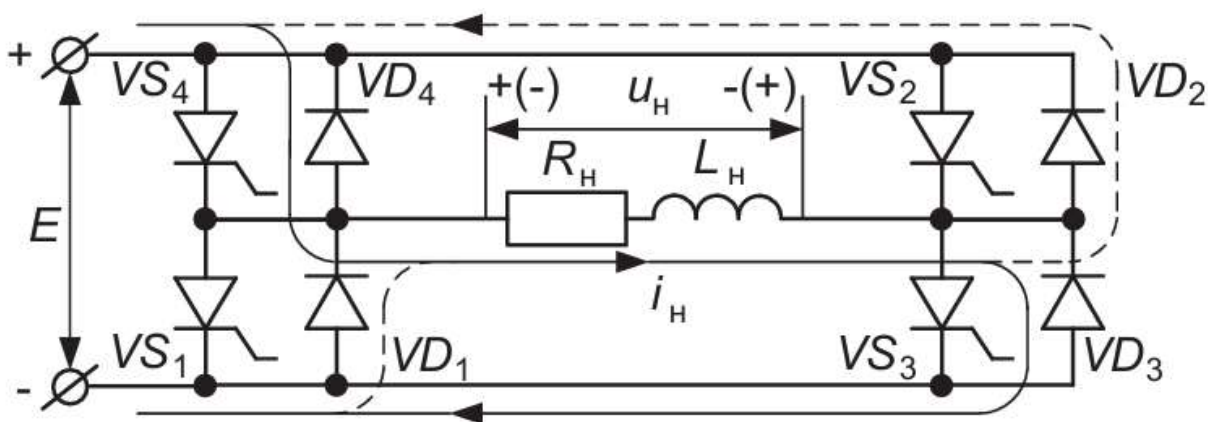


Рисунок 1.8 – Пример силовой части однофазного АИН [21]. Мостовая схема:
VS₁-VS₄ – тиристоры; VD₁-VD₄ – диоды

Диоды предназначены для пропускания тока активно-индуктивной нагрузки в интервалах времени, когда ток имеет направление, обратное для тиристоров (диоды обратного, встречного, или «реактивного» тока).

Для формирования напряжения, приближенного к синусоиде, поочередно отпираются тиристоры VS₁, VS₂ и VS₃, VS₄. В установившемся режиме кривая тока i_n

активно-индуктивной нагрузки симметрична и состоит из участков экспонент с постоянной времени $\tau = \frac{L_H}{R_H}$.

В интервале ϑ_0 - ϑ_1 (см. рисунок 1.9) проводят тиристоры VS_3 и VS_4 . Напряжение на нагрузке равно E и имеет полярность $+/-$. В момент ϑ_1 тиристоры VS_3 и VS_4 запираются, а тиристоры VS_1 и VS_2 отпираются. За счет наличия индуктивности в цепи нагрузки, ток i_H под действием ЭДС самоиндукции сохраняет в интервале ϑ_1 - ϑ_2 прежнее направление. Поскольку тиристоры VS_3 и VS_4 заперты, а тиристоры VS_1 и VS_2 не могут проводить в таком направлении, ток нагрузки в этом интервале проводят диоды VD_1 и VD_2 . Контур тока в таком случае будет проходить через источник. В некоторых случаях, например, когда источник постоянного тока является выпрямителем, источник шунтируют конденсатором, чтобы ток не протекал через него.

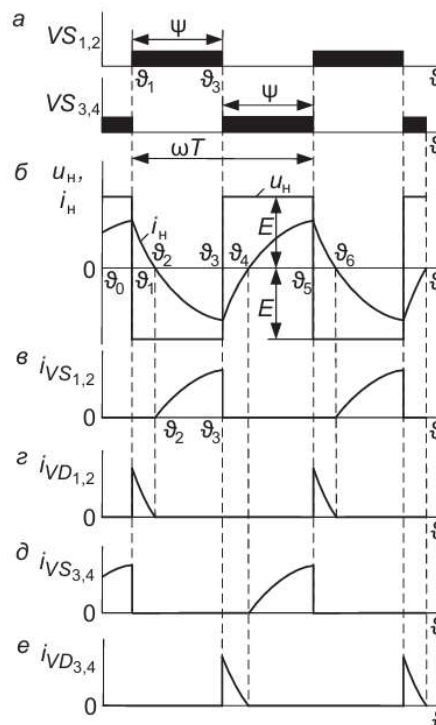


Рисунок 1.9 – Временные диаграммы выходного напряжения АИН

В современных устройствах зачастую применяют более сложную составную схему с высокочастотным трансформатором (рисунок 1.10), в которой, можно сказать, используется два инвертора. В данной схеме постоянный ток низкого напряжения DC (U_H) сначала преобразуется инвертором в переменный ток высокой частоты и низкого напряжения AC ($f_{в}$, U_H) с помощью push-pull преобразователя, посредством

высокочастотного трансформатора напряжение повышается до АС (f_v , U_v), при этом образуя гальваническую развязку. Затем переменный ток с помощью выпрямителя преобразуется в постоянный ток высокого напряжения DC ($U_v \approx 300$ В), после чего, при помощи второго инвертора, в переменный ток с нужной частотой и напряжением АС ($f_n = 50$ Гц, $U_v = 220$ В).

Основные проблемы, которые возникают в электрической сети при работе инверторного оборудования [22]:

- генерация гармонических искажений по току, особенно в области низкой загрузки инвертора;
- бросок тока при отключении со стороны постоянного тока;
- увеличение импеданса сети при изменении сопротивления сети становится сложнее сохранять баланс напряжения;
- становится проблематично согласовать уставки существующей релейной защиты, так как величина выходного тока ограничивается 1,2-1,4 от номинального тока;
- в энергосистеме ухудшаются инерционные характеристики, так как инверторы способны менять выходную мощность практически мгновенно.

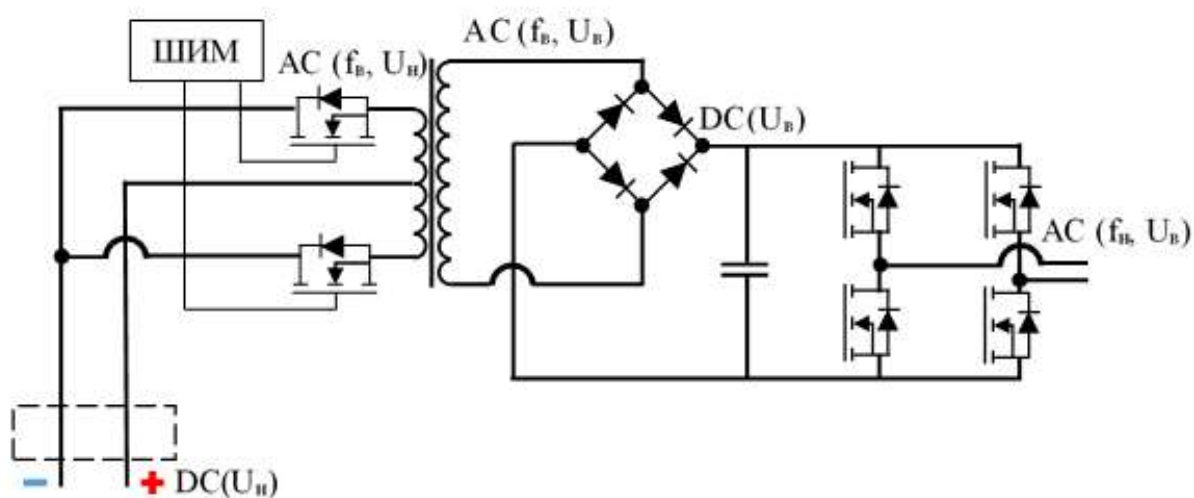


Рисунок 1.10 – Пример схемы инвертора с высокочастотным трансформатором

При работе 2-уровневых инверторов могут возникать следующие аварийные состояния: перегрев, перегрузка по току, переход IGBT в линейный режим (выход из насыщения). При прерывании тока из-за отключения IGBT или диода напряжение на полупроводниковом приборе начинает резко возрастать. Причиной этого является

накопление энергии магнитного поля в распределенной индуктивности длинного или короткого контура коммутации.

Классификация инверторов.

Инверторы можно разделить на различные типы в зависимости от множества параметров. Ниже приведен пример классификации инверторов:

- в соответствии с выходной характеристикой,
- в зависимости от типа нагрузки,
- в соответствии с различными методами ШИМ,
- в зависимости от количества выходных уровней,
- по опорному напряжению,
- по принципу действия, схемотехнике.

Рассмотрим классификацию инверторов более подробно:

1) В соответствии с выходной характеристикой.

По данной классификации разделяют 3 типа инверторов (см. рисунок 1.11) [23]:

- импульсный инвертор (прямоугольной волны/с меандром),
- модифицированный синусоидальный инвертор (квазисинусоидальный),
- синусоидальный инвертор (с чистой синусоидой).

Качество синусоиды на выходе инвертора влияет на способность инвертора питать определенную нагрузку, так как инверторы с модифицированной синусоидой могут создавать недопустимый уровень помех.

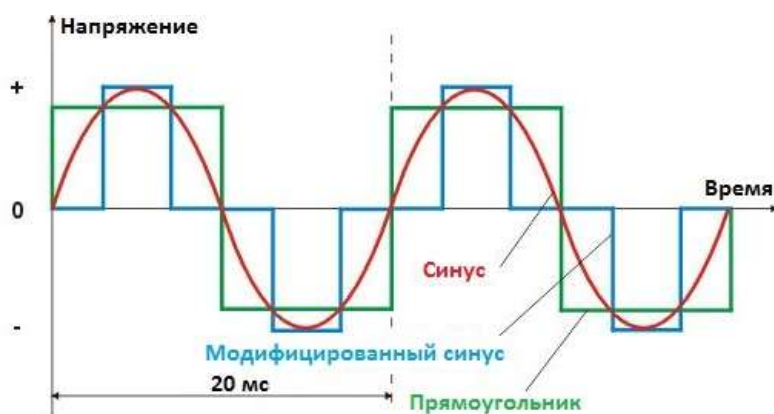


Рисунок 1.11 – Формы выходного напряжения инверторов

Выходной сигнал напряжения для импульсного инвертора представляет собой прямоугольную волну. На практике такая форма практически не применяется в серийно выпускаемых инверторах из-за большого числа генерируемых гармоник.

Форма выходного сигнала инверторов с квазисинусоидой приближена к синусоидальной волне. Такие инверторы могут работать с оборудованием, которое не так чувствительно к форме напряжения – с электронагревателями или потребителями с импульсными блоками питания.

Синусоидальный инвертор имеет на выходе напряжение в форме синусоидальной волны. Этот тип инверторов широко используется с чувствительными к качеству питающей сети приборами (аудио- и видеоаппаратура), с приборами со сложными схемами управления (компьютеры, лазерные принтеры, зарядные устройства, электроинструмент), а также с нагрузкой, использующей для работы электромагнитные процессы (холодильники, насосы, стиральные машины;

2) В зависимости от типа нагрузки.

В зависимости от типа нагрузки инверторы делятся на:

а) однофазные:

- полумостовые,
- мостовые,

б) трехфазные мостовые:

- режим 180 градусов,
- режим 120 градусов.

Однофазные инверторы, как правило, используются в коммерческой и жилой нагрузке. Разделяют полумостовой и мостовой однофазный инвертор.

Однофазный полумостовой инвертор состоит из двух тиристоров и двух диодов, подключенных как показано на рисунке 1.12).

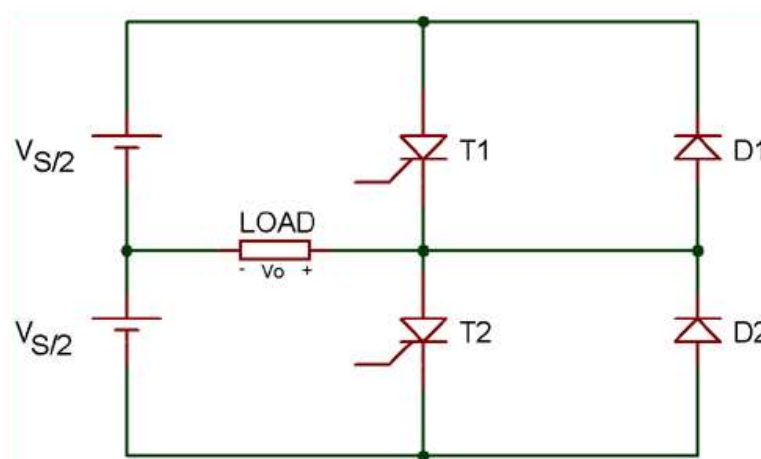


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема однофазного полумостового инвертора

В представленной схеме общее напряжение постоянного тока равно V_S и разделено на две равные части $V_{S/2}$. Время одного цикла составляет T сек. В течение полупериода $0 < t < T/2$ тиристор Т1 проводит ток. Напряжение нагрузки составляет $V_{S/2}$. Во втором полупериоде $T/2 < t < T$ тиристор Т1 коммутруется, а Т2 проводит ток. В этот период напряжение нагрузки составляет $-V_{S/2}$.

Таким образом можно получить сигнал переменного напряжения с частотой $1/T$ Гц и пиковой амплитудой $V_{S/2}$. Частотой сигнала можно управлять с помощью времени включения и выключения тиристоров. Величина выходного напряжения составляет половину напряжения питания, а период использования источника – 50 %.

В однофазном мостовом инверторе используются четыре тиристора и четыре диода. Принципиальная схема однофазного мостового инвертора моста представлена на рисунке 1.13.

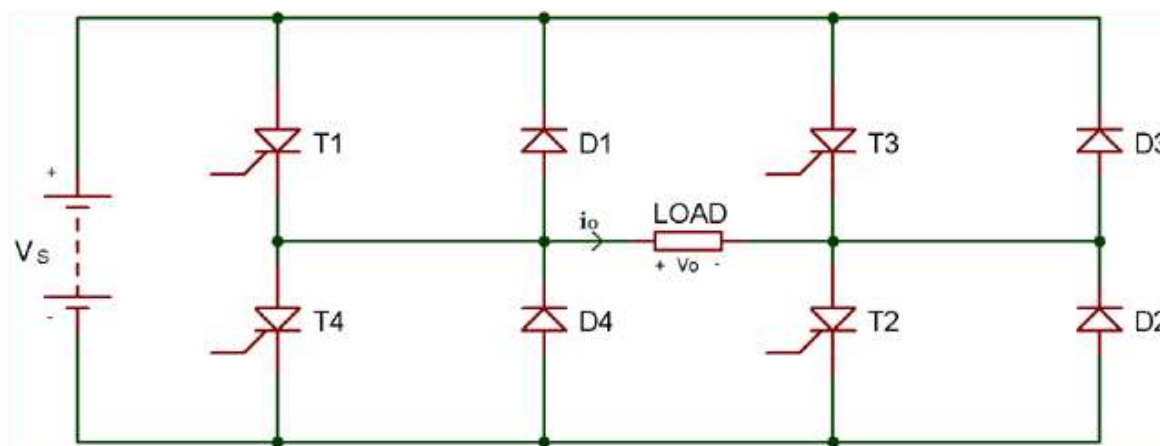


Рисунок 1.13 – Принципиальная схема однофазного мостового инвертора

В этой схеме одновременно два тиристора Т1 и Т2 проводят первый полупериод $0 < t < T/2$. В течение этого периода напряжение нагрузки составляет V_S , что аналогично напряжению питания постоянного тока. Во втором полупериоде $T/2 < t < T$ два тиристора Т3 и Т4 проводят ток, напряжение нагрузки в этот период составляет $-V_S$.

Благодаря этому возможно получить выходное напряжение переменного тока такое же, как напряжение питания постоянного тока, а коэффициент использования источника увеличить до 100 %.

Трехфазный мостовой инвертор используется для питания промышленной нагрузки. В инверторе этого типа используются шесть тиристоров и шесть диодов, которые подключены, как показано на рисунке 1.14.

При работе в режиме 180 градусов время проводимости тиристора составляет 180 градусов (таблица 1.2). В любой момент периода три тиристора (по одному тиристоры от каждой фазы) находятся в режиме проводимости. Форма фазного напряжения представляет собой три ступенчатых сигнала, а форма линейного напряжения представляет собой квазипрямоугольную волну. В этой операции временной интервал между коммутацией выходного тиристора и проводимостью входного тиристора равен нулю. Таким образом, возможно одновременное проведение входного и выходного тиристора. Это приводит к короткому замыканию источника. Чтобы избежать этой трудности, используется 120-градусный режим работы.

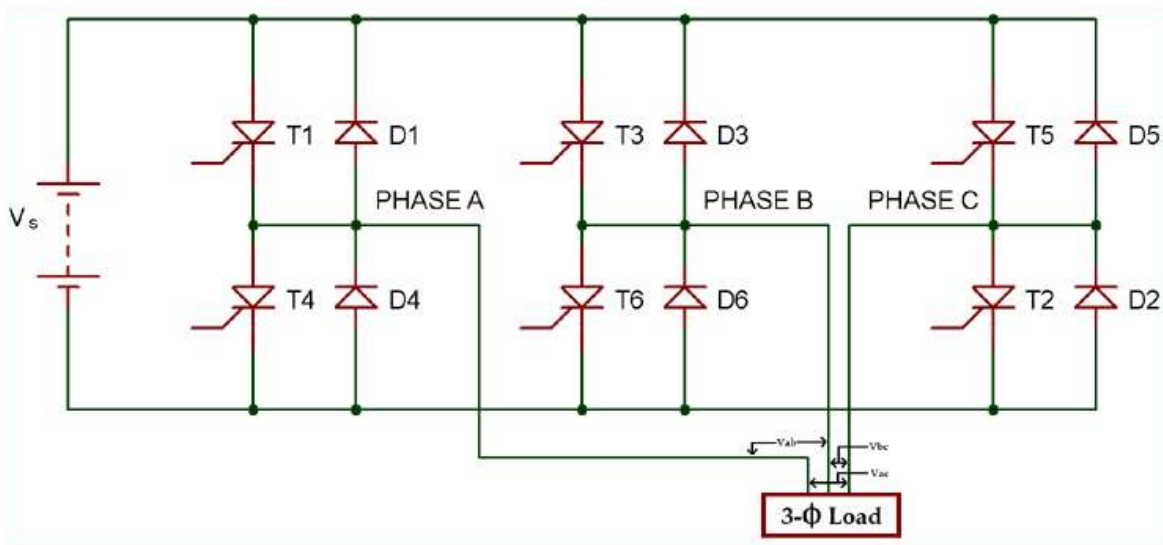


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема трехфазного мостового инвертора

Таблица 1.2 – Время проводимости каждого тиристора в режиме 180 градусов

Параметр	Значение											
Фаза А	T1			T4			T1			T4		
Фаза В	T6			T3			T6			T3		
Фаза С	T5			T2			T5			T2		
Угол	60	120	180	240	300	360	60	120	180	240	300	360
Тиристор проводит	156	612	123	234	345	456	156	612	123	234	345	456

В режиме 120 градусов одновременно проводят ток только два тиристора. Одна из фаз тиристора не соединена ни с положительной клеммой, ни с отрицательной. Время проводимости каждого тиристора составляет 120 градусов (таблица 1.3). Форма линейного напряжения представляет собой трехступенчатый сигнал, а форма фазного напряжения – квазиквадратную форму;

Таблица 1.3 – Время проводимости каждого тиристора в режиме 120 градусов

Параметр	Значение											
Фаза А	T1			T4			T1			T4		
Фаза В	T6		T3			T6			T3			T6
Фаза С		T2			T5			T2			T5	
Угол	60	120	180	240	300	360	60	120	180	240	300	360
Тиристор проводит	16	21	32	34	45	65	16	21	32	34	45	56

3) В соответствии с различными методами ШИМ.

По данной классификации разделяют 4 типа инверторов:

- одиночная широтно-импульсная модуляция (одиночный ШИМ),
- множественная широтно-импульсная модуляция (MPWM),
- синусоидальная широтно-импульсная модуляция (SPWM),
- модифицированная синусоидальная широтно-импульсная модуляция (MSPWM).

Метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) используется для управления выходным напряжением переменного тока. Это достигается за счет управления периодом включения и выключения переключателей. В методе ШИМ используются два сигнала: прямоугольный или синусоидальный опорный сигнал и треугольный сигнал несущей. Затворный импульс для переключателей генерируется путем сравнения этих двух сигналов.

В методе одиночной широтно-импульсной модуляции для каждого полупериода доступен только один импульс (см. рисунок 1.15). Стробящий импульс для переключателей генерируется путем сравнения опорного сигнала и сигнала несущей. Частота выходного напряжения контролируется частотой опорного сигнала. Амплитуда опорного сигнала равна A_r , а амплитуда сигнала несущей равна A_c , индекс модуляции можно определить как A_r/A_c . Основным недостатком этого метода является высокое содержание гармоник.

Множественная широтно-импульсная модуляция (MPWM) решает недостаток метода одиночной ШИМ. В этой методике вместо одного импульса используется несколько импульсов в каждом полупериоде выходного напряжения (рисунок 1.16). Строб генерируется путем сравнения опорного сигнала и сигнала несущей. Выходная частота контролируется путем управления частотой несущего сигнала. Индекс модуляции используется для управления выходным напряжением.

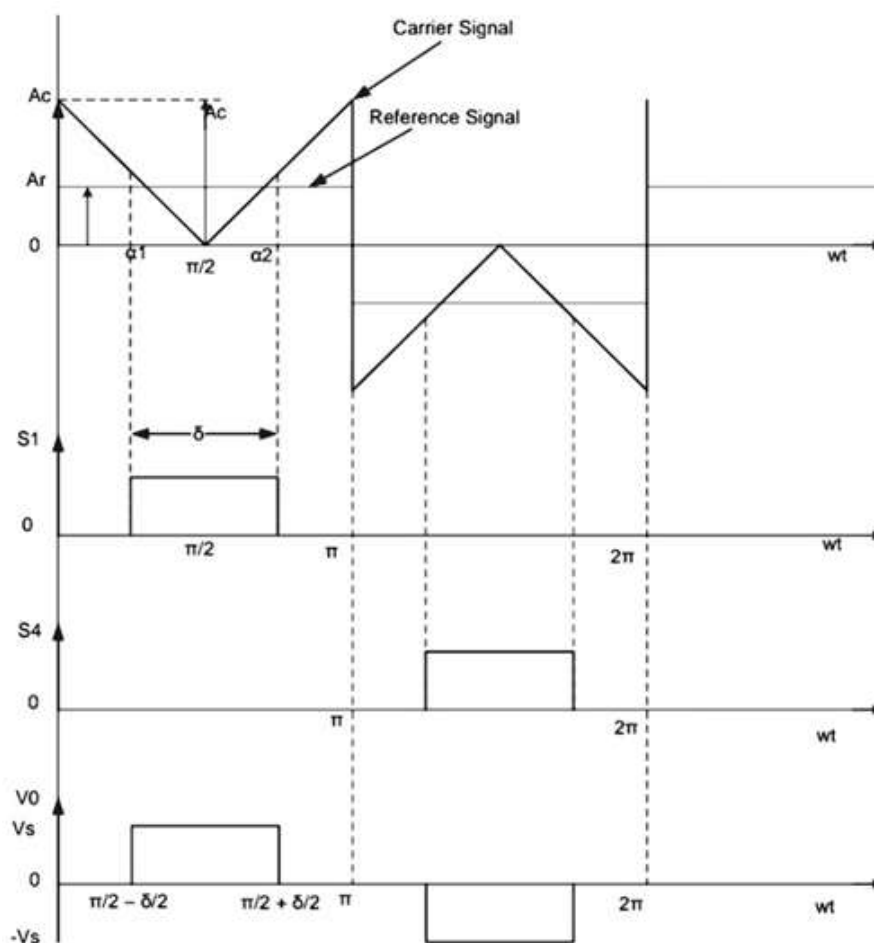


Рисунок 1.15 – Характеристики при одиночной ШИМ

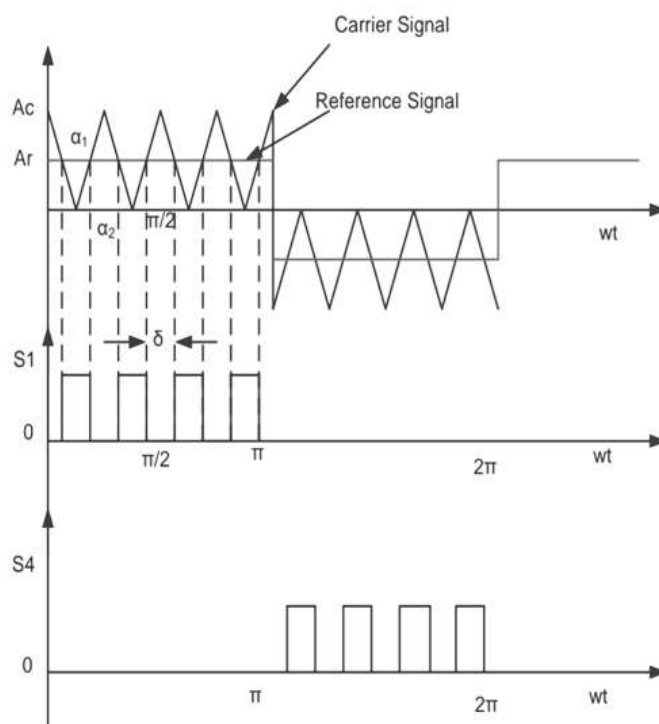


Рисунок 1.16 – Характеристики при множественной ШИМ

Синусоидальная широтно-импульсная модуляция широко используется в промышленности. В обоих вышеупомянутых методах опорный сигнал представляет собой сигнал прямоугольной формы, но в этом методе опорный сигнал представляет собой синусоидальный сигнал (рисунок 1.17). Строблирующий импульс для переключателей генерируется путем сравнения синусоидального опорного сигнала с треугольной несущей. Ширина каждого импульса меняется в зависимости от амплитуды синусоидальной волны. Частота выходного сигнала такая же, как частота опорного сигнала. Выходное напряжение представляет собой синусоидальную волну, а среднеквадратичное напряжение можно контролировать с помощью индекса модуляции.

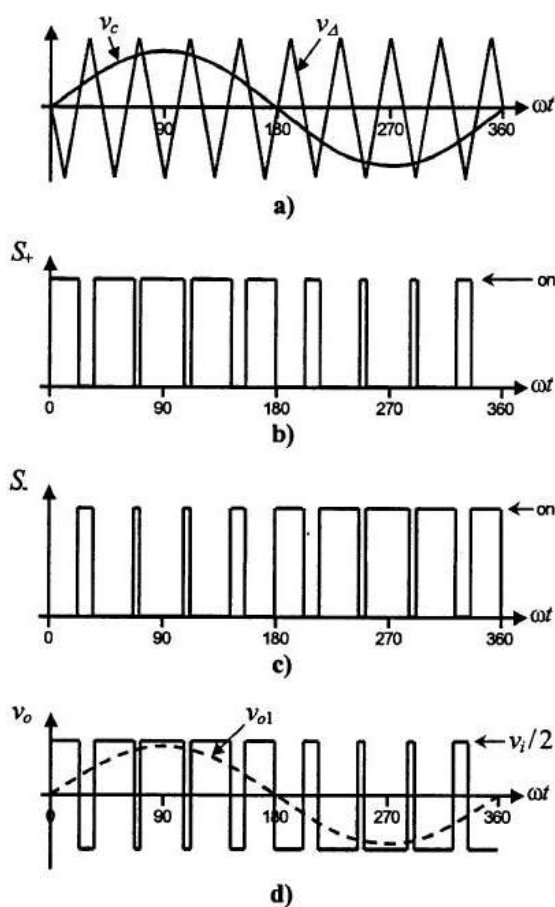


Рисунок 1.17 – Характеристики при синусоидальной ШИМ

Из-за особенностей синусоидальной волны ширина импульса волны не может быть изменена с изменением индекса модуляции в методе SPWM. По этой причине введена модифицированная синусоидальная широтно-импульсная модуляция (MSPWM). В этом методе сигнал несущей подается в течение первого и последнего 60-градусного интервала каждого полупериода (рисунок 1.18). Таким образом, улучшаются гармонические

характеристики. Основным преимуществом этого метода является увеличение основной составляющей, уменьшение количества переключаемых силовых устройств и снижение потерь на переключение;

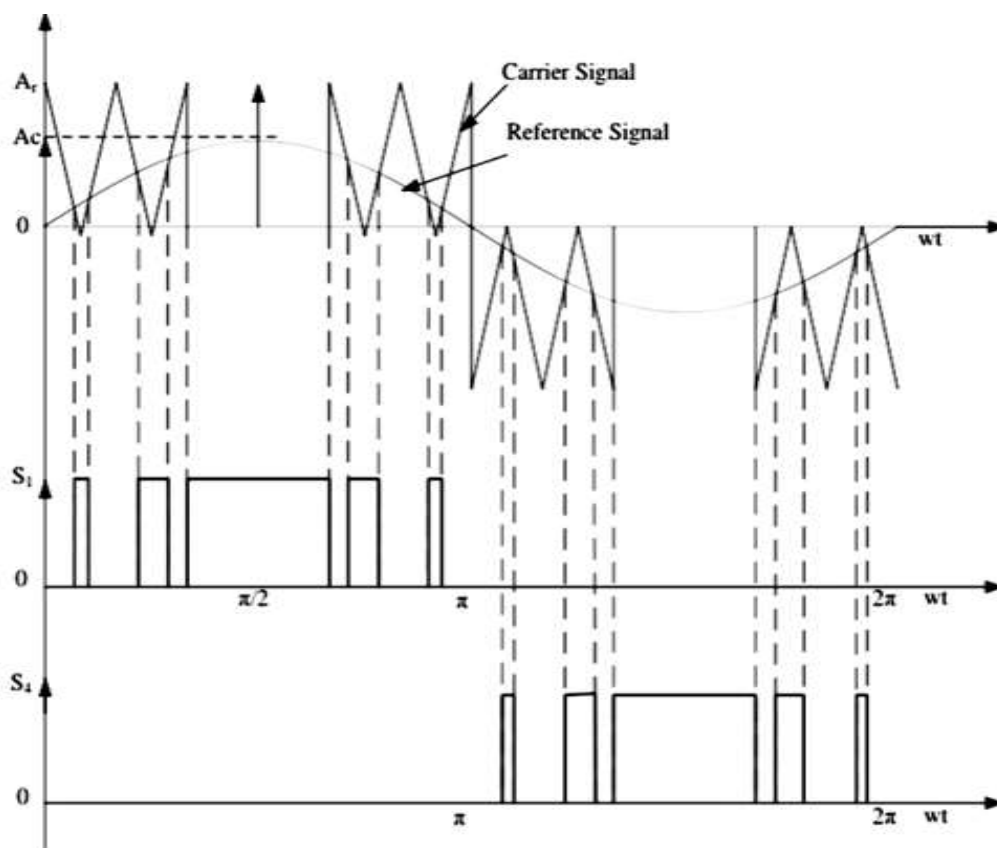


Рисунок 1.18 – Характеристики при модифицированной синусоидальной ШИМ

4) По количеству уровней на выходе.

Различают 2 типа инверторов по количеству уровней на выходе: двухуровневый и многоуровневый инвертор.

Двухуровневые инверторы имеют только уровни напряжения, которые представляют собой пиковое положительное и отрицательное напряжение. В простейшем случае чтобы получить на выходе полумостового IGBT-модуля синусоидальное напряжение, достаточно иметь на его входе $+V$ и $-V$ и за счет ШИМ формировать из $+V$ положительную полуволну, а из $-V$ – отрицательную. Так работают двухуровневые инверторы, осциллограмма напряжений которых схематично показана на рисунке 1.19.

Многоуровневые инверторы могут иметь несколько уровней напряжения на выходе. Две возможные схемотехнические реализации – со связью со средней точкой через диоды и с Т-образным мостом (см. рисунки 1.20 и 1.21) [24]. Принципиальное

отличие трехуровневых инверторов состоит в том, что при ШИМ для формирования выходного напряжения используются все три входных уровня, выход модуля поочередно соединяется с каждым из трех входных напряжений. Осциллограмма напряжений при таком способе коммутации схематически показана на рисунке 1.22.

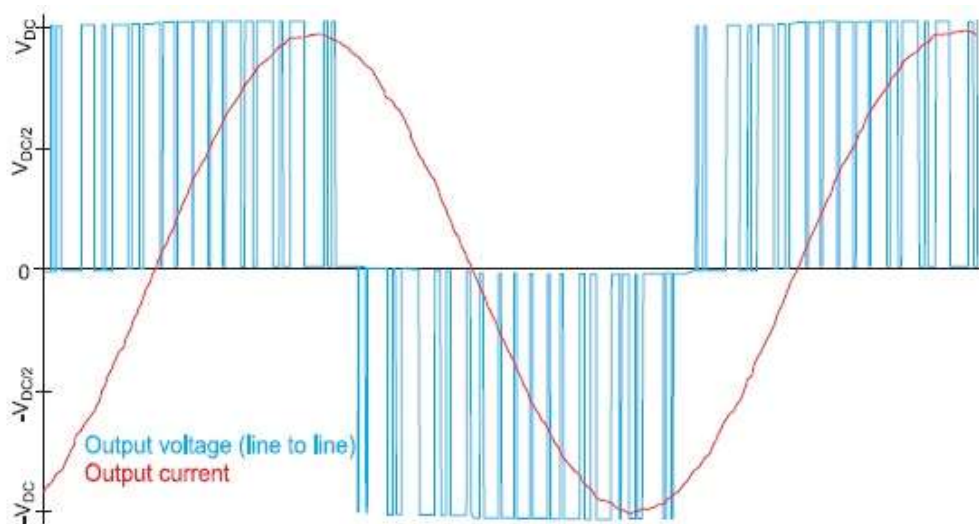


Рисунок 1.19 – Осциллограмма напряжений двухуровневого инвертора

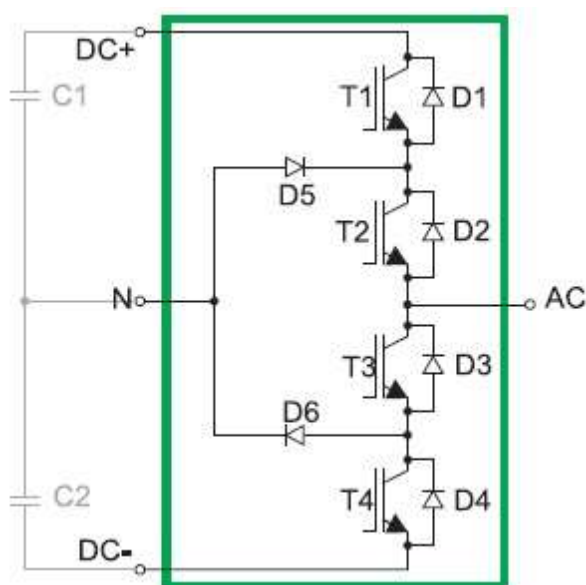


Рисунок 1.20 – Схематическая реализация трехуровневого инвертора со связью со средней точкой через диоды

Трехуровневый инвертор позволяет использовать полупроводники с максимальной эффективностью, практически с полной загрузкой по напряжению. Таким образом, возможно применение полупроводников, рассчитанных на меньшее номинальное

напряжение. Это важное преимущество перед двухуровневым инвертором. Кроме того, полупроводники с меньшим рабочим напряжением имеют преимущества по всем остальным параметрам, важнейшие из которых – время переключения и падение напряжения в открытом состоянии. Трехуровневые инверторы имеют больший КПД, а в выходном синусоидальном сигнале содержится меньше неосновных гармоник, что позволяет уменьшить фильтры.

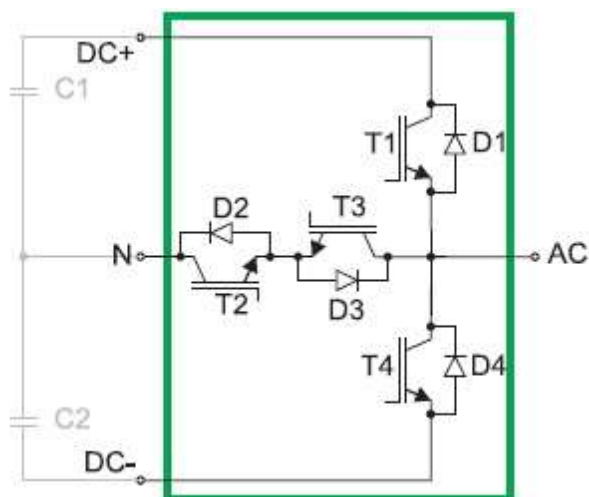


Рисунок 1.21 – Схематическая реализация трехуровневого инвертора с T-образным мостом

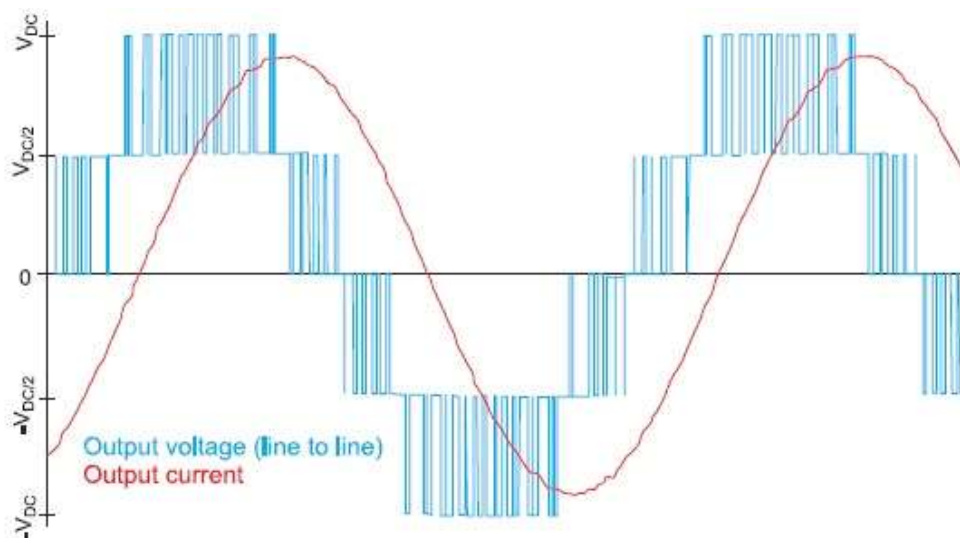


Рисунок 1.22 – Осциллограмма напряжений трехуровневого инвертора

Трехуровневый инвертор на IGBT-модулях со связью со средней точкой через диоды имеет в своем составе 10 полупроводников: четыре IGBT (T1-T4), по два в верхнем

и нижнем плече; четыре диода (D1-D4) для гашения выбросов напряжения, по одному параллельно IGBT; два подтягивающих диода D5, D6, ток через которые может течь из линии 0V в нагрузку или из нагрузки в линию 0V. Для подключения к линиям питания и нагрузке модуль имеет четыре силовых контакта: три входа и один выход.

Трехуровневый инвертор на IGBT-модулях с Т-образным мостом имеет в своем составе только восемь полупроводников: четыре IGBT (T1-T4) и четыре диода D1-D4. Так же, как и модуль со связью со средней точкой через диоды, модуль с Т-образным мостом имеет четыре силовых контакта, три из которых – входы, предназначенные для подключения к напряжению питания $-V$, 0, $+V$, а один – выход. Разница между двумя конструкциями в том, что в модуле с Т-образным мостом линия питания 0V соединяется с выходом модуля транзисторами. Это дает большую гибкость при реализации ШИМ, а возможность закрыть одновременно все ключи, соединяющие линии питания с нагрузкой, необходима при аварийном отключении. Конструкция с Т-образным мостом позволяет использовать полупроводники с различными максимальными рабочими напряжениями. Максимальное напряжение, которое может быть приложено к каждому из транзисторов T2 и T3 при работе модуля, вдвое меньше напряжения, которое может быть приложено к транзисторам T1 и T4.

Для достижения такого же уровня неосновных гармоник в выходном синусоидальном сигнале для трехуровневых инверторов требуется меньшая частота переключения, как следствие – сокращение потерь при переключении. При работе на одинаковых частотах у трехуровневых инверторов уровень неосновных гармоник в выходном синусоидальном напряжении меньше. Трехуровневый инвертор требует более сложной схемы управления, а его энергопотребление вдвое больше, чем двухуровневого.

Количество полупроводников, через которые одновременно протекает электрический ток, в трехуровневых инверторах удвоено, что увеличивает потери энергии. При одинаковых питающих напряжениях максимальные рабочие напряжения полупроводников в трехуровневых инверторах могут быть меньше. Например, если напряжение питания 750 В, то для коммутации устройств можно использовать двухуровневый инвертор с максимальным рабочим напряжением 1200 В либо трехуровневый с максимальным рабочим напряжением 650 В. На полупроводниках в трехуровневом инверторе при этом напряжение составит лишь 375 В ($750/2$). При этом необходимо, чтобы источник питания был двуполярным и имел среднюю точку;

5) По опорному напряжению.

По данной классификации инверторы делятся на сетевые, автономные и гибридные.

Для сетевых инверторов электрическая сеть является опорным источником частоты и напряжения. В случае отключения от сети инвертор перестает работать. Выдаваемое такими инверторами напряжение на доли вольта выше, чем напряжение в сети, поэтому энергия перетекает от источника через сетевой инвертор в сеть, и далее потребляется ближайшим к точке подключения сетевого инвертора потребителем.

У фотоэлектрических сетевых инверторов есть такой параметр как входное пусковое напряжение инверторов, которое примерно на 30 В выше минимального рабочего напряжения. Перед запуском инверторов цепь разомкнута, ток равен нулю, а напряжение близко к напряжению холостого хода при текущей освещенности. Когда инверторы запускаются, ток от солнечной батареи увеличивается, а напряжение снижается. Для предотвращения отключения инвертора, пусковое напряжение устанавливают выше минимального рабочего напряжения. При включении инверторы сначала проходят самопроверку, затем определяются параметры электросети. Генерация начнется только когда фотоэлектрическая мощность превысит мощность инверторов в режиме ожидания.

Сетевые инверторы разделяются на 3 подвида:

- микроинверторы,
- стринговые,
- центральные.

Микроинвертор имеет мощность от 250 Вт до 1600 Вт. Особенностью микроинверторов является то, что они устанавливаются непосредственно под солнечными модулями, к каждому из микроинверторов подключается от 1 до 4 модулей. Так как отслеживание точки максимальной мощности производится на уровне 1-4 солнечных модулей, влияние затенения на работу солнечной электростанции минимально. Обычно микроинверторы передают информацию о работе каждого солнечного модуля центральному коммутационному центру и программному обеспечению.

Основная и самая распространенная технология сетевых солнечных инверторов – стринговые инверторы. В такой системе несколько модулей подключаются к одному инвертору. Подключение солнечных панелей является последовательным, панели образуют одну большую цепочку (string – англ.).

Стринг-инвертор – это однофазный инвертор мощностью обычно от 1 до 10 кВт, или трехфазный мощностью 3 до 125 кВт. Каждая цепочка модулей, подключаемых к сетевым инверторам, может состоять из 4-20 солнечных модулей, соединенных последовательно. Для уменьшения влияния частичного затенения могут применяться DC-оптимайзеры, через которые подключается каждый солнечный модуль. В некоторых моделях оптимайзеров есть возможность сбора статистики по параметрам солнечного модуля, что облегчает локализацию поврежденных цепочек или модулей. В отличие от микроинверторов, оптимизаторы не преобразуют постоянный ток в переменный, они находят точку максимальной мощности для каждой солнечной панели в цепочке и устанавливают такой режим, при котором каждая панель вырабатывает максимум возможной мощности.

Центральные сетевые инверторы применяются в больших коммерческих СЭС. Мощность таких инверторов – от нескольких сотен кВт до нескольких мегаватт. Обычно они работают при высоком напряжении на стороне как постоянного, так и переменного тока. К ним подключаются множество цепочек солнечных модулей напряжением до 1500 В, а выход АС центрального инвертора через трансформатор подключается к высоковольтной линии электропередачи. Центральные инверторы предназначены больше для крупных коммерческих и промышленных установок. Центральный инвертор обычно располагается в отдельном контейнере или помещении.

Инвертор может включать в себя контроллер для заряда аккумуляторов от источника постоянного тока – солнечных батарей или ветроустановок. Такие устройства называются «комбинированными».

Гибридный инвертор – это такое устройство, которое может работать параллельно с источником переменного тока, одновременно питая нагрузку и от аккумуляторов, и от сети, и имеет функцию приоритета для источника постоянного тока (аккумуляторов, солнечной батареи, ветроустановки и т.п.). Особенностью гибридного инвертора является именно возможность параллельной работы с источником переменного тока в режиме инвертора [25];

6) По принципу действия, схемотехнике.

По принципу действия можно выделить низкочастотные и высокочастотные преобразователи. Их отличие состоит в частоте работы повышающих напряжение трансформаторов. В низкочастотных инверторах силовые ключи работают на низком

напряжении, поэтому для обеспечения одинаковой мощности преобразования для них требуются ключи на большие токи.

В высокочастотном инверторе (см. рисунок 1.23) преобразование обычно проходит в два этапа:

- высокочастотное DC/DC преобразование постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения. Сначала напряжение постоянного тока низкого напряжения преобразуется в высокочастотный переменный ток низкого напряжения. Затем напряжение повышается с помощью высокочастотного трансформатора. После выпрямления с помощью высокочастотной схемы выпрямления и фильтрации он становится постоянным током высокого напряжения;

- высокое напряжение постоянного тока преобразуется в переменный ток. На этом этапе формируется переменное напряжение низкой частоты, которое подается на нагрузку через низкочастотный фильтр.



Рисунок 1.23 – Высокочастотный инвертор

Поскольку в высокочастотном инверторе используются малогабаритные и легкие материалы с высокочастотным магнитным сердечником, потери источника питания инвертора на холостом ходу малы, а эффективность инвертора высокая.

Высокочастотные инверторы широко используются, когда требуется портативность, высокая эффективность и быстрое реагирование. Например, в аэрокосмической, военной технике, транспортных средствах и в других областях предъявляются высокие требования к объему, весу и эффективности инверторов. Кроме того, высокочастотные инверторы

могут использоваться в областях возобновляемых источников энергии для реализации дешевого преобразования энергии.

В низкочастотном инверторе (см. рисунок 1.24) на выходе преобразователя устанавливают трансформатор. Поскольку между источником питания и нагрузкой установлена гальваническая развязка, инвертор обладает высокой перегрузочной способностью и стойкостью к импульсным нагрузкам, а также может подавлять гармонические компоненты высокого порядка. Однако низкочастотные трансформаторы также имеют проблемы: они громоздки и дороги, а их эффективность относительно низкая. Номинальная эффективность нагрузки небольшого низкочастотного преобразователя обычно не превышает 90 %. В то же время потери в железе низкочастотного трансформатора практически не изменяются, когда низкочастотный трансформатор работает при частичной нагрузке.



Рисунок 1.24 – Низкочастотный инвертор

Двигатели, компрессоры или насосы, которые имеют большие пусковые токи (до 5-7 кратных от номинального) лучше запускаются от низкочастотного инвертора, потому что в них имеется запас энергии в электромагнитном поле силового трансформатора. Высокочастотные инверторы имеют на выходе электронные ключи, которые могут быть легко повреждены пиковыми токами нагрузки, поэтому обычно в таких инверторах имеется программное ограничение выходной мощности, и они отключаются при превышении нагрузки над номинальной.

Низкочастотный инвертор может выдерживать большую импульсную мощность. Он более надежен, особенно при питании нагрузки с большой реактивной составляющей, таких как двигатели переменного тока. Высокочастотный инвертор будет достаточно хорош, если нагрузка чисто резистивная, такая как освещение и электроника.

Благодаря стабильной форме выходного сигнала и низкому уровню электромагнитных помех, низкочастотный инвертор подходит для применений, требующих высокого качества электроэнергии и чувствительных к электромагнитной среде. Например, измерительные приборы, медицинское оборудование, оборудование связи и др. Кроме того, низкочастотные инверторы также являются хорошим выбором для режимов, требующих длительной стабильной работы.

Параметры инверторов.

Наиболее важными параметрами инвертора являются КПД, а также входные и выходные мощность (номинальная и пиковая), напряжение и ток. Рассмотрим подробнее эти параметры, а также ограничения, предписываемые нормативными актами на параметры оборудования и сети:

1) Основные характеристики инверторов.

Номинальная выходная мощность инвертора – это мощность, которая может выдаваться непрерывно и стабильно в течение длительного времени. Пиковая мощность, также известная как максимальная мощность, относится к максимальному значению мощности, которое инвертор может выдать за короткое время (от 20 мс до 5 с). Пиковая мощность обычно в 2-3 раза превышает номинальную. Пиковая мощность определяет мощность, которую может выдать инвертор при пуске нагрузки. Для запуска различных двигателей обычно требуется в 3-5 раз больше мощность, чем номинальная долговременная мощность потребления.

КПД преобразования инвертора зависит от схемотехники и качества применяемых электронных компонентов. В общем случае кривая эффективности зависит от входного напряжения инвертора и от его загруженности. В спецификациях инверторов обычно указывается его максимальный КПД, иногда приводят кривую зависимости КПД от загрузки инвертора при разных значениях входного напряжения (см. рисунок 1.25 [26]).

Мощность и КПД инвертора также зависят от температуры окружающей среды. При этом стоит помнить, что номинальная мощность инверторов разных производителей может указываться для различных температур (20 °С, 45 °С и т.д.). Пример зависимости мощности от температуры приведен на рисунке 1.26 [26];

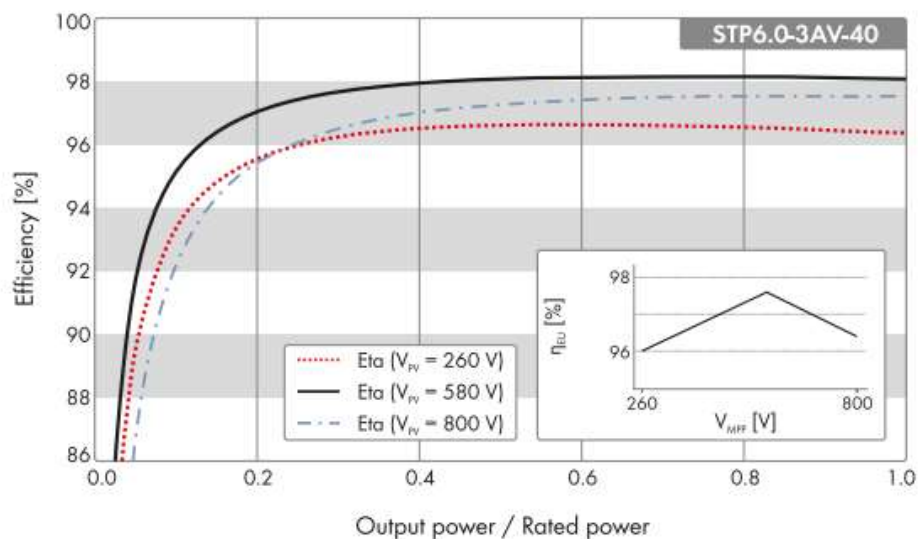


Рисунок 1.25 – Зависимость КПД сетевого солнечного инвертора от загрузки при различных входных напряжениях

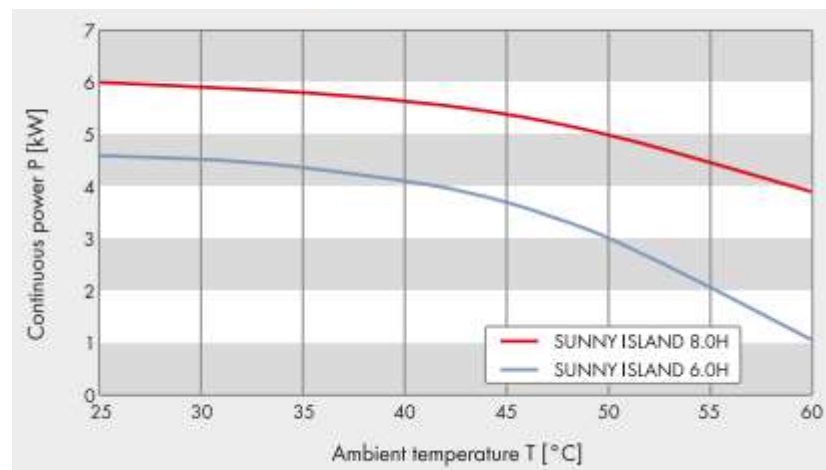


Рисунок 1.26 – Зависимость мощности инвертора от температуры

2) Ограничения на параметры инверторов.

В технической документации на некоторые виды инверторов могут указывать особые ограничения на режим работы оборудования. Например, в документации на отечественный инвертор ИНС указаны следующие ограничения на работу [27]:

- время работы при перегрузке: при перегрузке до 110 % время работы инвертора не должно превышать 20 минут, при перегрузке от 110 до 125 % – 10 минут, при перегрузке от 125 до 150 % – 60 секунд. При перегрузке более 150 % инвертор должен переходить в режим токоограничения, при этом выходной ток не превысит 200 % номинального значения при трехфазной перегрузке и 400 % при однофазной перегрузке;

– время работы без нагрузки: инвертор переходит в «спящий» режим через 15-20 секунд работы без нагрузки и вновь включается в течение времени до 20 секунд при наличии на выходе нагрузки или при переключении режима в положение «Активный».

Рассмотрим, какие ограничения установлены отечественными нормативными актами.

Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 № 937 [28] содержит требования к работе электрооборудования при определенных значениях частоты. Данные правила распространяются на: «Субъекты электроэнергетики и потребителей электрической энергии, которые владеют ... входящими в состав энергосистемы объектами электросетевого хозяйства классом напряжения 35 килвольт и выше и (или) объектами по производству электрической энергии; распространяется на объекты электросетевого хозяйства, входящих в состав технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем, – независимо от класса напряжения...».

Согласно пункту 110, «Работа генерирующего оборудования электрических станций, за исключением атомных электростанций, с любой нагрузкой в пределах регулировочного диапазона активной мощности обеспечивается:

– длительно – при изменении частоты электрического тока в диапазоне значений 49-50,5 Гц (для ветроэнергетических установок и фотоэлектрических солнечных модулей – в диапазоне значений 49-51 Гц), включая верхнюю границу диапазона изменения частоты;

– кратковременно (таблица 1.4) – при изменении частоты электрического тока в следующих диапазонах значений (включая верхнюю границу указанных диапазонов изменения частоты)».

Таким образом, Постановление устанавливает требования к отклонению частоты, при которых инверторы обязаны не отключаться.

Таблица 1.4 – Кратковременная продолжительность работы генерирующего оборудования электрических станций

Диапазон частот, Гц	Продолжительность работы
55-51	устанавливается заводом изготовителем
51-50,5	не менее 3 минут
49-48	не менее 5 минут
48-47	не менее 40 секунд
47-46	не менее 1 секунды
46	не менее 1 секунды

1.2.2 Системы бесперебойного питания

Параметры систем бесперебойного питания регламентируются стандартом ГОСТ 27699-88 (СТ СЭВ 5874-87) [29], который распространяется на системы бесперебойного питания, состоящие из полупроводниковых инверторов, выпрямителей, коммутирующих устройств и аккумуляторных батарей, и предназначенных для питания непрерывным напряжением переменного тока частотой 50 или 60 Гц одно- и трехфазных приемников в случае отключения или ухудшения качества электрической энергии источника питания переменного тока на входе.

Цепи постоянного тока СБП должны отвечать следующим требованиям:

- номинальные напряжения из ряда: 24, 48, 60, 110, 220, 440 В;
- допустимое изменение напряжений: [-15 %; +25 %];
- значение переменной составляющей выпрямленного напряжения, вызванной устройствами, не входящими в состав СБП, – не более 5 % от значения номинального напряжения постоянного тока.

Инверторы должны исполняться с основными электрическими параметрами (см. таблицу 1.5).

Таблица 1.5 – Основные электрические параметры инверторов

Напряжение питания постоянного тока, В	Рекомендуемые исполнения инверторов при мощности, кВА ¹																		
	0,5	0,63	1	1,6	2,0	2,5	3	4	6,3	10	16	25	31,5	40	63	100	125	160	250
24	+	+	+	+	+	+	+	+											
48	+	+	+	+	+	+	+	+	+										
60	+	+	+	+	+	+	+	+	+										
110	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+								
220	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
440																+	+	+	+

Эффективное значение выходного напряжения однофазных и трехфазных инверторов, симметрично загруженных, не должно измениться более, чем на:

- $\pm 2\%$ – для номинальной нагрузки и номинального напряжения питания, а также в диапазоне плавных изменений тока нагрузки от нуля до значения номинального тока линейного характера, при одновременных плавных изменениях питающего напряжения постоянного тока в пределах [-15 %; +25 %], а также при одновременных изменениях

¹ Допускается исполнять инверторы с выходной мощностью выше 250 кВА, при этом рекомендуется использовать модульный множитель 1,5 или 1,6 для мощностей инверторов и применять значение напряжения питания постоянного тока 440 В.

коэффициента мощности приемника от 0,8 индуктивного или емкостного до 1 активного характера при температуре окружающей среды от 0 до 40 °С;

- $\pm 3\%$ – для трехфазных инверторов с асимметрией нагрузки фаз меньшей, чем 15 % в диапазоне нагрузки от 50 до 100 % номинального значения;

- $\pm 10\%$ ($\pm 5\%$ для напряжения между проводами) – для асимметрии нагрузки, когда две фазы нагружены номинальным током при холостом ходе третьей фазы.

Максимальное начальное отклонение выходного напряжения для однофазных и трехфазных инверторов при изменениях тока нагрузки скачком от нуля до номинального значения и наоборот, при номинальном напряжении питания инверторов, не должно быть более $\pm 30\%$ амплитудного значения установившегося линейного или фазного напряжения. Это отклонение не должно превышать указанного выше значения также при изменениях скачком напряжения постоянного тока, питающего инвертор, в диапазоне изменений от номинального до максимального значения (от -15% до $+10\%$) при номинальной нагрузке. Время длительности максимального отклонения не должно быть более 40 мс. Время регулирования выходного напряжения от момента возникновения возмущения до достижения 2% установившегося напряжения не должно превышать 200 мс.

Номинальная частота выходных напряжений инвертора должна составлять 50 или 60 Гц. Диапазон установки частоты выходного напряжения должен составлять не менее $\pm 2\%$. Допускается изменение частоты выходного напряжения $\pm 1\%$ по отношению к номинальному значению при изменениях тока нагрузки скачком от нуля до номинального значения и наоборот при номинальном напряжении питания инверторов и при изменении температуры окружающей среды в диапазоне $[0; +40]$ °С.

Инвертор должен работать без повреждений при токовых перегрузках до $1,1 \cdot I_{\text{ном}}$ в течение 15 мин, при этом такая перегрузка не должна возникать чаще одного раза в течение 2 ч.

Инверторы должны быть приспособлены к питанию приемников с коэффициентом мощности от 0,8 до 1 индуктивного или емкостного линейного характера.

При внешних коротких замыканиях инверторы должны быть способны отдавать ток короткого замыкания не меньше 2-кратного значения номинального тока в течение до 0,1 с.

1.2.3 Инверторы напряжением до 1 кВ и номинальными токами на выходе до 10 кА

Для инверторов напряжением до 1000 В, номинальными токами на выходе до 10 кА и частотой до 10 кГц действует ГОСТ 24376-91 [30], однако, этот стандарт не распространяется на ведомые (сетевые) инверторы.

Номинальные значения токов на выходе инверторов должны выбираться из ряда, представленного в таблице 1.6.

Номинальные значения напряжений на входе инверторов должны выбираться из ряда: 6, 12, 27, 48, 60, 110, 220, 440 В. Допускается изготавливать инверторы с напряжением на входе 24, 250 В.

Инверторы должны обеспечивать выходные параметры при работе на приемнике электроэнергии, содержащие линейные или нелинейные электрические цепи, при изменении тока на выходе в диапазоне 5-100 % номинального значения. Виды приемников электроэнергии, их параметры, пусковые характеристики и допускаемые значения отношения мощности приемников электроэнергии каждого вида к номинальной мощности нагрузки инвертора должны быть установлены в ТУ на инверторы конкретных серий и типов. В зависимости от вида приемников электроэнергии или инверторов допускается изменять нижнее значение тока на выходе инверторов.

Таблица 1.6 – Номинальные токи на выходе инверторов

Номинальный выходной ток, А						
	0,10	1,0	10,0	100	1000	10 000
	0,12		12,5	125	1250	
	0,16		16,0	160	1600	
	0,20	2,0	20,0	200	2000	
	0,25		25,0	250	2500	
	0,30		31,5	315	3150	
0,04	0,40	4,0	40,0	400	4000	
			50,0	500	5000	
0,06	0,60	6,3	63,0	630	6300	
		8,0	80,0	800	8000	

Инверторы должны обеспечивать выходные параметры с заданной точностью при допускаемых отклонениях напряжения на входе, выбираемых из ряда: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 10; 15 %. Допускается при работе от химических источников тока изготавливать инверторы на диапазон изменения напряжения на входе, выбираемый из ряда: 21-34, 48-72, 95-170, 175-320, 190-290, 200-280 В.

1.2.4 Инверторы полупроводниковые мощностью до 5 кВА

На полупроводниковые инверторы мощностью до 5 кВА действуют стандарты ГОСТ 26282-84 [31] и ГОСТ 26830-86 [32]. Их требования не распространяются на: «...уникальные преобразователи, выпускаемые мелкими сериями (до 10 шт); ...; на преобразователи, являющиеся составными частями более сложных преобразователей и не имеющие технических условий; на преобразователи специального назначения для работы во взрывоопасных средах и средах с токопроводящей пылью; ...; на преобразователи, используемые для электротермического оборудования и электролиза, ...; на преобразователи бытового назначения». Стандарты устанавливают ряды номинальных значений входных и выходных напряжений и частот, выходных токов, а также нормы качества электрической энергии для нормального режима работы преобразователей.

Коэффициент искажения кривой напряжения на входе должен выбираться из ряда: 1, 3, 5, 8, 10, 12, 16, 18, 20 %. Коэффициент небаланса напряжения для преобразователей с двухфазным и трехфазным входом не должен превышать 5 %, если иное не установлено в стандартах и технических условиях на конкретные серии и типы преобразователей.

Номинальные напряжения переменного тока на выходе преобразователей должны соответствовать значениям, выбранным по ГОСТ 21128-83:

- 6; 12; 28,5; 42; 62; 115; 230 В – для однофазного тока;
- 42; 62; 230; 400; 690 В – для трехфазного тока.

Установившиеся отклонения выходного напряжения должны соответствовать значениям 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 15 %, выбранным по ГОСТ 21128-83.

Допускается при коротких питающих линиях разработка преобразователей с выходным напряжением, равным напряжению приемника.

Преобразователи со стабилизированным выходным напряжением должны обеспечивать заданные параметры в диапазоне изменения тока нагрузки 5-100 % номинального значения. Преобразователи должны обеспечивать параметры при работе на линейную, нелинейную, активную, индуктивную, емкостную или смешанную нагрузки. Вид нагрузки, ее параметры, схема эквивалента при испытаниях и допустимые значения отношения мощности нагрузки каждого вида к номинальной мощности преобразователя должны быть указаны в стандартах и ТУ на преобразователи конкретных серий и типов.

Коэффициент искажения кривой выходного напряжения инверторов и преобразователей частоты должен соответствовать значениям, выбираемым из ряда: 1, 3, 5, 8, 10, 16, 20 %.

Номинальные постоянные и переменные токи на выходе преобразователей должны соответствовать значениям, выбранным по ГОСТ 6827-76 (см. таблицу 1.7).

Таблица 1.7 – Значения номинальных токов на выходе преобразователей

Номинальный выходной ток, А					
	0,010	0,10	1,0	10,0	100
		0,12	1,25	12,5	125
	0,016	0,16	1,6	16,0	160
		0,20	2,0	20,0	200
	0,025	0,25	2,5	25,0	250
		0,30	3,15	31,5	315
0,004	0,04	0,40	4,0	40	400
		0,50	5,0	50	
0,006	0,06	0,60	6,3	63	
		0,80		80	

Установившиеся отклонения частоты выходного напряжения преобразователей должны соответствовать значениям 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 5,0 %, выбранным по ГОСТ 6697-83. Коэффициент небаланса выходного напряжения при симметричной нагрузке преобразователей трехфазного тока не должен превышать значений, выбираемых из ряда: 2, 3, 5 %. В технически обоснованных случаях требование к преобразователям по обеспечению выходных параметров при перенапряжениях на входе не устанавливают.

Преобразователи должны функционировать при кратковременных отклонениях частоты входного напряжения на 10 % за время до 5 с. Допускаемый диапазон изменения коэффициента мощности нагрузки инверторов и преобразователей частоты должен соответствовать значениям, выбираемым из ряда: 0,3-1,0; 0,6-1,0; 0,7-1,0; 0,8-1,0. Значения переходных отклонений выходных напряжений при симметричной нагрузке не должны превышать норм, выбираемых из ряда: ± 10 , ± 15 , ± 25 , ± 30 , ± 40 ; ± 50 %, при времени восстановления, выбираемого из ряда: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 с, если это указано в стандартах и ТУ на преобразователи конкретных серий и типов. Нормы на переходные отклонения выходного напряжения преобразователей должны обеспечиваться при скачкообразном изменении входного напряжения от номинального до наибольшего (наименьшего) нормированного значения и обратно, выходного тока (сброс-наброс нагрузки в диапазоне 5-100 % номинального значения или 50 % номинального значения из любого возможного состояния по нагрузке), что должно быть указано в стандартах и ТУ на преобразователи конкретных серий и типов.

Допускается в зависимости от вида преобразователя в стандартах и ТУ на преобразователи конкретных серий и типов устанавливать дополнительные требования к электрическим параметрам по ГОСТ 26282-84.

1.2.5 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые мощностью 5 кВА и выше

ГОСТ 25953-83 [33] распространяется на полупроводниковые преобразователи электроэнергии мощностью 5 кВА и выше; не распространяется на: «...преобразователи, являющиеся составными частями более сложных преобразователей и не имеющие технических условий, а также работающие во взрывоопасных средах и средах с токопроводящей пылью, преобразователи бытового назначения». Стандарт устанавливает ряды номинальных значений постоянного и переменного токов 0,1-300 000 А, постоянного напряжения 6-160 000 В, переменного напряжения 6-220 000 В, частоты переменного тока 5-10 000 Гц. Стандарт не устанавливает номинальные значения напряжений, токов и частот для: аварийных режимов работы и переходных процессов; цепей, замкнутых внутри преобразователей; внутренних цепей устройств измерения, контроля, сигнализации и управления; преобразователей, работа которых по принципу действия не характеризуется фиксированным значением напряжения и тока.

Номинальные токи на выходе преобразователей для постоянного и переменного токов должны в соответствии с ГОСТ 6827-76 выбираться из ряда, представленного в таблице 1.8.

Номинальные напряжения переменного тока на выходе преобразователей с выходным напряжением до 1000 В должны в соответствии с ГОСТ 21128-75 выбираться из ряда: 6; 12; 28,5; 42; 62; 115; 230; 400; 690 В. Номинальные напряжения преобразователей с выходным напряжением свыше 1000 В должны в соответствии с ГОСТ 721-77, ГОСТ 23366-78 выбираться из ряда: 1 200, 3 150, 6 300, 10 500, 15 750, 21 000, 115 000 В. Номинальные напряжения на выходе преобразователей с бестрансформаторным входом и (или) выходом устанавливают в стандартах и технических условиях на преобразователи конкретных серий и типов.

1.2.6 Параметры современных инверторов

В рамках данного исследования были проанализированы паспортные характеристики существующих линеек наиболее популярных в России производителей инверторного оборудования (немецкие SMA [34–54], китайские Sungrow [55–93], Kehua [94–111], Goodwe [112–137], Kstar [138,139], французские Victron [140–150]). Эта

информация сведена в приложение А. В выборку не попали линейки инверторов с номинальной частотой только 60 Гц, а также инверторы, предназначенные для работы в конкретных странах (США, Австралия и т.д.). Как следует отметить, в данном списке отсутствуют отечественные производители инверторов.

Таблица 1.8 – Значения номинальных выходных токов

Номинальный выходной ток, А						
0,1	1,0	10,0	100	1000	10 000	100 000
					(11 200) ²	
		12,5	125	1250	12 500	125 000
					(14 000)	
0,16	1,6	16,0	160	1600	16 000	160 000
					(18 000)	
0,2	2,0	20,0	200	2000	20 000	200 000
0,25	2,5	25,0	250	2500	25 000	250 000
					(28 000)	
0,3	3,15	31,5	315	3150	31 500	
					(35 500)	
					37 500	
0,4	4,0	40,0	400	4000	40 000	
					(45 000)	
0,5	5,0	50,0	500	5000	50 000	
					(56 000)	
0,6	6,3	63,0	630	6300	63 000	
					(71 000)	
					75 000	
0,8	8,0	80,0	800	8000	80 000	

При изучении характеристик силовых инверторов возникает множество трудностей. Например, в отличие от фотоэлектрических модулей, для которых существуют условия тестирования STC и NOCT, для инверторов отсутствуют подобные условия. В связи с этим производители зачастую указывают не полную информацию, или характеристики инверторов при неодинаковых условиях. В линейках батарейных инверторов SMA Sunny Central Storage UP-XT [42,43] и Sunny Central Storage UP [40] указаны номинальные параметры выходной мощности и тока для 25/40/50 °С, для батарейных инверторов Sunny Central Storage UP-S [41] эти же параметры представлены для 35/40/50 °С, а для Sunny Central UP – при 35/50 °С. Компания Sungrow для линейки CX [66] указала номинальную выходную мощность для различных значений выходного

² Значения, приведенные в скобках, – неперспективные и в новых разработках не применяются.

напряжения при не одинаковых температурах (см. рисунок 1.27): для напряжения 400 В при 45 и 40 °С, а для 415 В при 50 и 45 °С [66].

Для линейки Sungrow SgxxxxUD-20 [76,80,84] представлена выходная мощность при 52/23 °С, а для линейки SgxxxxUD-MV-20 [78,82,85,87,89] при 51/23 °С.

Также для особо крупных инверторов в комплекте есть силовой трансформатор, чья мощность может ограничивать мощность инвертора (см. рисунок 1.28) [79]. В данном примере представлены два одинаковых инвертора, однако один из них представляет собой два инвертора в одном устройстве.

При этом некоторые производители предоставляют информацию для нескольких значений температуры во всех или почти во всех документах, или приводят графически зависимость выходной мощности от температуры (в документации Victron Enegrу указаны значения номинальной мощности при 25, 40 и 65 °С, а в SMA указаны значения номинальной мощности и максимального выходного тока при 25, 40 и 50 °С).

Пример паспортных характеристик существующих линеек наиболее популярных производителей инверторов представлен в таблице 1.9.

1.2.7 Заключительные положения

Инверторы представляют из себя комплексное техническое устройство. Они являются ключевыми компонентами в системах бесперебойного питания и возобновляемой энергетики. При этом работа инверторного оборудования в электрической сети сопряжено с определенными негативными последствиями: генерация большого числа гармоник, трудности с согласованием уставок релейной защиты, изменение импеданса и инерционных характеристик сети.

Инверторы зачастую представляют из себя электронные компоненты (диоды и тиристоры или транзисторы), соединенные по мостовой схеме, для формирования переменного тока осуществляется попеременное переключение ключей для изменения полярности напряжения на нагрузке. Современные инверторы часто используют двухэтапное преобразование с высокочастотным трансформатором, что обеспечивает гальваническую развязку, малые габариты и высокий КПД.

В существующих технических правилах указанные значения являются рекомендательными, ими можно воспользоваться в случае отсутствия данных в технической документации на конкретные модели инверторов. Современные инверторы изготавливаются на параметры, отличные от рекомендуемых в российских ГОСТ. При этом они в основном удовлетворяют требованиям работы при отклонении частоты.

Type designation	SG33CX	SG40CX	SG50CX
Input (DC)			
Max. PV input voltage	1100 V **		
Min. PV input voltage / Start-up input voltage	200 V / 250 V		
Nominal PV input voltage	585 V		
MPP voltage range	200 – 1000 V		
No. of independent MPP inputs	3	4	5
No. of PV strings per MPPT	2		
Max. PV input current	3 * 26 A	4 * 26 A	5 * 26 A
Max. DC short-circuit current	3 * 40 A	4 * 40 A	5 * 40 A
Output (AC)			
AC output power	33 kVA @ 45 °C, 400Vac / 36.3 kVA @ 40 °C, 400Vac	40 kVA @ 45 °C, 400Vac / 44 kVA @ 40 °C, 400Vac	50 kVA @ 45 °C, 400Vac / 55kVA @ 40 °C, 400Vac
	33 kVA @ 50 °C, 415Vac / 36.3 kVA @ 45 °C, 415Vac	40 kVA @ 50 °C, 415Vac / 44 kVA @ 45 °C, 415Vac	50kVA @ 50 °C, 415Vac / 55kVA @ 45 °C, 415Vac
Max. AC output current	55.2 A	66.9 A	83.6 A
Nominal AC voltage	3 / N / PE, 230 / 400 V		
AC voltage range	312 – 528 V		
Nominal grid frequency / Grid frequency range	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz		
Harmonic (THD)	< 3 % (at nominal power)		
DC current injection	< 0.5 % I _n		
Power factor at nominal power / Adjustable power factor	> 0.99 / 0.8 leading – 0.8 lagging		
Feed-in phases / AC connection	3 / 3		

Рисунок 1.27 – Зависимость мощности инвертора от температуры

Type designation	SG3125HV-MV-30	SG3400HV-MV-30
Input (DC)		
Max. PV input voltage	1500 V	
Min. PV input voltage / Startup input voltage	875 V / 915 V	
MPP voltage range	875 – 1300 V	
No. of independent MPP inputs	2	
No. of DC inputs	16 / 18 / 22 / 24 / 28 (max. 24 for floating system)	
Max. PV input current	3997 A	
Max. DC short-circuit current	10000 A	
PV array configuration	Negative grounding or floating	
Output (AC)		
AC output power	3125 kVA @ 50 °C / 3437 kVA @ 45 °C	3437 kVA @ 45 °C
Max. inverter output current	3308 A	
AC voltage range	20 kV – 35 kV	
Nominal grid frequency / Grid frequency range	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz	
Harmonic (THD)	< 3 % (at nominal power)	
DC current injection	< 0.5 % In	
Power factor at nominal power / Adjustable power factor	> 0.99 / 0.8 leading – 0.8 lagging	
Feed-in phases / AC connection	3 / 3-PE	
Efficiency		
Inverter max. efficiency	99.0%	
Inverter Euro. efficiency	98.7%	
Transformer		
Transformer rated power	3125 kVA	3437 kVA
Transformer max. power	3437 kVA	
LV / MV volatage	0.6 kV / (20 – 35) kV	
Trnsformer vector	Dy11	
Transformer cooling type	ONAN (Oil-natural, air-natural)	
Oil type	Mineral oil (PCB free) or degradable oil on request	

Рисунок 1.28 – Зависимость мощности инвертора от температуры

Таблица 1.9 – Пример паспортных характеристик существующих линеек наиболее популярных производителей инверторов

Фирма	Линейка	Назначение	$N_{\text{ном}}^{\text{вых}}$, кВт	$T_{\text{ном мощ}}$, °C	$N_{\text{пик}}^{\text{вых}}$, кВт	$U_{\text{мин}}^{\text{вых}}$, В	$U_{\text{вкл}}$, В	$U_{\text{макс}}^{\text{вых}}$, В	$I_{\text{кз}}^{\text{вых}}$, А
SMA	Sunny Boy	Солнечный	3	Нет	5,5	110	125	600	20
SMA	Sunny Boy Smart Energy	Комбинированный	3,6	Нет	7,2	60	66	600	30
SMA	Sunny Central Storage UP-XT	Батарейный	2667	25		880		1500	500000
SMA	Sunny Central Storage UP-S	Батарейный	2933	35		962		1500	500000
Kstar	GSE-T	Батарейный	50	Нет		400		1000	
Goodwe	HT	Солнечный	73	Нет			200	800	45
SMA	Sunny Tripower	Солнечный	3	Нет	6	125	175	850	18
SMA	Sunny Highpower PEAK3	Солнечный	100	Нет	200	570	625	1100	180
SMA	Sunny Highpower Storage	Батарейный	100	Нет	18	590		1500	

Продолжение таблицы 1.9

Фирма	Линейка	$I_{\text{макс}}^{\text{вых}}$, А	$U_{\text{мин}}^{\text{вых}}$, В	$U_{\text{ном}}^{\text{вых}}$, В	$U_{\text{макс}}^{\text{вых}}$, В	$I_{\text{ном}}^{\text{вых}}$, А	$I_{\text{макс}}^{\text{вых}}$, А	$f_{\text{мин}}^{\text{вых}}$, Гц	$f_{\text{макс}}^{\text{вых}}$, Гц
SMA	Sunny Boy	15	180	230	280	13,1	13,7	45	55
SMA	Sunny Boy Smart Energy	15	184	230	253	15,7	16,0	44	66
SMA	Sunny Central Storage UP-XT	3200	480	600	720	Нет	2566	47	53
SMA	Sunny Central Storage UP-S	3200	528	660	792	Нет	2566	47	53
Kstar	GSE-T	142	320	400	460	80	80	48	52
Goodwe	HT	30	187	220	242	Нет	192	45	55
SMA	Sunny Tripower	12	180	230	280	4,40	4,60	45	55
SMA	Sunny Highpower PEAK3	325	177	400	477	Нет	151	44	55
SMA	Sunny Highpower Storage	180	320	400	460	Нет	151	44	55

1.3 Применение суперконденсаторов

1.3.1 Общие положения

Рост распределенной генерации и широкое внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приводят к увеличению числа объектов с переменной и стохастической выработкой электроэнергии. Солнечные фотоэлектрические и ветроэнергетические установки подвержены быстрым флуктуациям мощности, что вызывает переходные процессы в электрических сетях и ухудшение показателей качества электроэнергии. Для компенсации указанных эффектов в электроэнергетике все более широко применяются гибридные системы накопления электроэнергии (СНЭЭ), позволяющие объединять накопители различной физической природы и тем самым одновременно удовлетворять требованиям по энергоемкости, мощности и быстродействию.

Результаты исследований международных аналитических центров, таких как National Renewable Energy Laboratory (NREL), International Energy Agency (IEA) и др., свидетельствуют о том, что в период с 2015 по 2024 год установленная мощность и количество введенных в эксплуатацию гибридных СНЭЭ увеличились в 4-6 раз. При этом объем мирового рынка достиг 10-17 млрд долл. США, а среднегодовые темпы роста сохраняются на уровне 7-16 % [151–154].

В последние годы разработан широкий спектр технологий систем накопления энергии (СНЭ), которые в общем виде подразделяются на электрические, электрохимические, химические и механические системы хранения. Согласно ГОСТ Р 58092.1-2021 [155], накопители электроэнергии классифицируют по виду энергии, используемой для накопления, включая электрохимические (аккумуляторные батареи и проточные батареи), химические (в том числе водородные), а также электрические накопители, к которым относятся двойнослойные конденсаторы и сверхпроводящие индуктивные накопители. Пример указанной классификации приведен на соответствующем рисунке.

В соответствии с ГОСТ Р 58092.3.1-2020 [156], к накопителям энергии, достигшим наилучших эксплуатационных характеристик и наибольшей степени технологической зрелости, относятся литийионные и аналогичные им аккумуляторные батареи большой емкости, суперконденсаторы и электромеханические накопители энергии (рисунок 1.29) [157]. На практике в электроэнергетических и автономных системах применяются различные СНЭ, включая суперконденсаторы (СК), сверхпроводящие магнитные накопители энергии, маховики, насосные гидроаккумулирующие установки, аккумуляторные батареи, накопители энергии со сжатым воздухом и водородные системы.

Среди перечисленных технологий аккумуляторные батареи рассматриваются как один из наиболее значимых и перспективных типов СНЭ для обеспечения устойчивости энергосистем [158], тогда как в автономных и изолированных системах накопители энергии играют ключевую роль в компенсации кратковременных колебаний мощности и поддержании качества электроэнергии [159–162]. Области применения СНЭ в различных секторах представлены на рисунке 1.30.

Следует отметить, что каждая технология СНЭ обладает присущими ей ограничениями, определяющими область применения. В идеальном случае система накопления должна одновременно обеспечивать высокую энергоемкость и высокую мощность, однако на практике большинство СНЭ ограничены либо по удельной мощности, либо по удельной энергии. В связи с этим концепция гибридных систем накопления энергии предполагает объединение двух и более СНЭ с взаимодополняющими характеристиками [163].

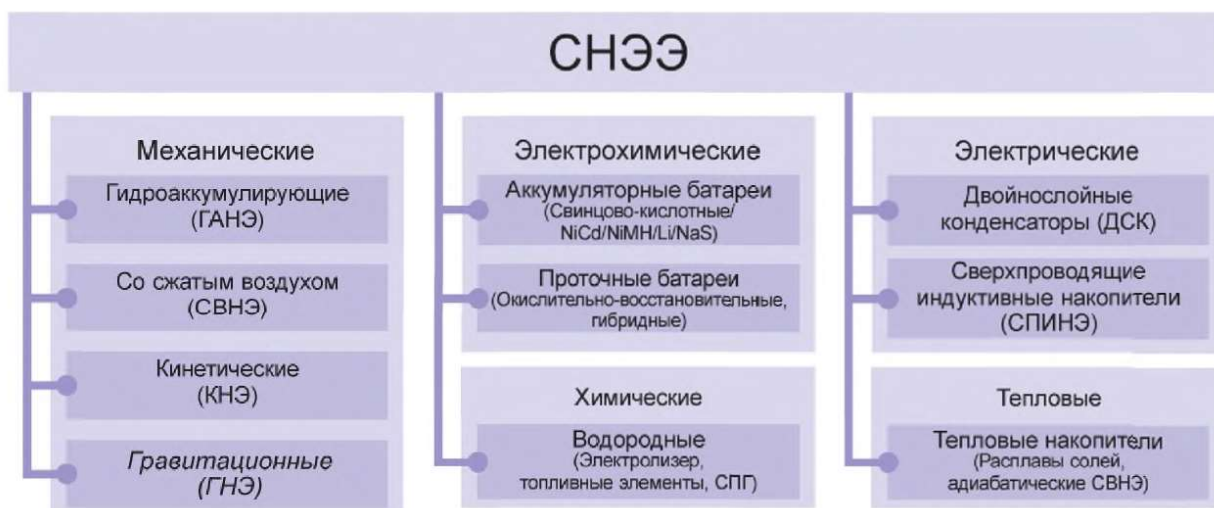


Рисунок 1.29 – Пример классификации СНЭЭ в зависимости от вида используемой энергии: NiCd – никель-кадмиевые; NiMH – никель-металлгидридные; Li – литийионные; NaS – натрий-серные; СПГ – синтезированный природный газ

Наиболее показательным примером является комбинация аккумуляторных батарей и суперконденсаторов. Аккумуляторные батареи характеризуются высокой удельной энергией, сравнительно низкой удельной мощностью, ограниченным ресурсом циклов и низким саморазрядом. В свою очередь, суперконденсаторы обладают высокой удельной мощностью, чрезвычайно быстрым откликом, большим числом циклов заряда-разряда и повышенным саморазрядом при относительно низкой удельной энергии (см.

таблицу 1.10) [158,159,164,165]. Совмещение данных технологий позволяет эффективно использовать их сильные стороны, что делает архитектуру «АКБ + СК» одной из наиболее распространенных в современных гибридных СНЭЭ.

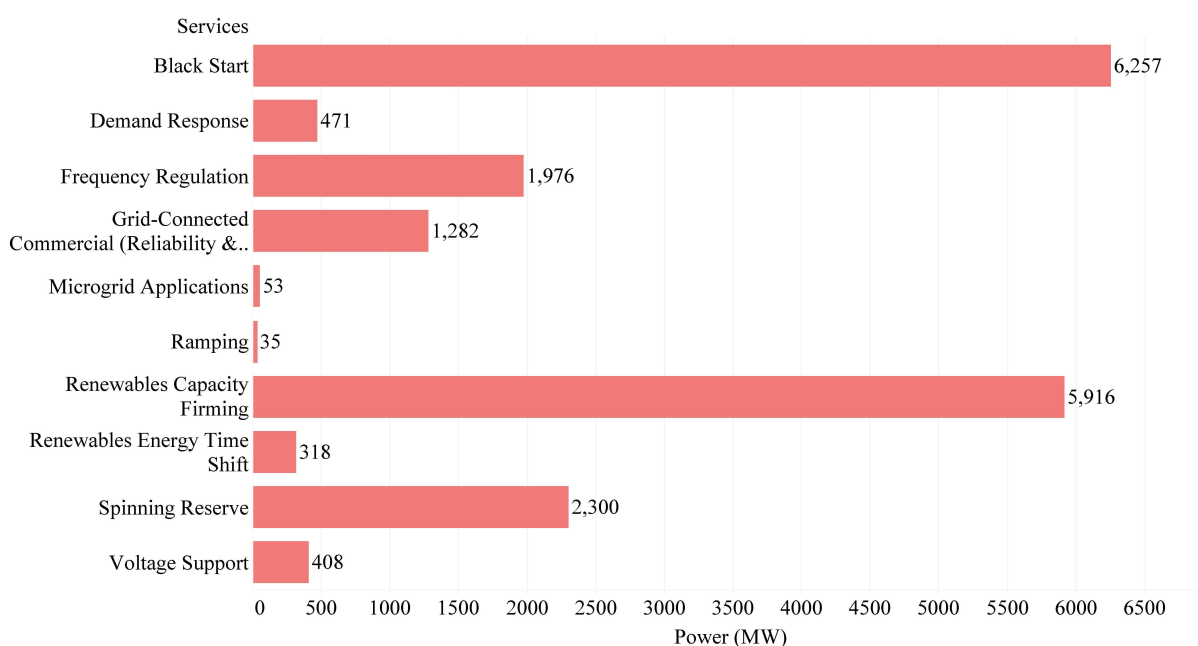


Рисунок 1.30 – Применение накопителей энергии

Таблица 1.10 – Сравнение технических характеристик АКБ и СК

Параметр	АКБ	СК
Способ накопления	Электрохимический	Электростатический
Время заряда	$1 < t < 5$ ч	1-30 с
Сохранность заряда	Высокая	Низкая
Время разряда	$t > 0,3$ ч	1-30 с
Эффективность заряда/разряда	0,7-0,85	0,85-0,98
Срок службы (количество циклов)	1000	10^6
Плотность энергии, Вт·ч/кг	10-100	1-10
Плотность мощности, Вт/кг	< 1000	10 000

Преимущества реализации гибридных СНЭ заключаются в снижении первоначальных капитальных затрат за счет развязки функций накопления энергии и мощности, повышении общей эффективности системы, а также увеличении срока службы аккумуляторных батарей вследствие снижения динамических нагрузок и оптимизации режимов работы. Среди различных вариантов гибридизации именно конфигурация «аккумуляторные батареи + суперконденсаторы» фактически стала стандартом для

распределенных электроэнергетических систем благодаря технологической совместимости, широкой доступности и относительно низкой стоимости.

В составе гибридных СНЭЭ суперконденсаторы берут на себя кратковременные пики нагрузки и быстро протекающие переходные процессы, эффективно разгружая аккумуляторные батареи. Это позволяет снизить амплитуды токов и напряжений в переходных режимах, улучшить качество электроэнергии на шине постоянного тока и существенно увеличить ресурс АКБ [160]. Рост практического применения суперконденсаторов подтверждается и рыночными данными: мировой рынок СК в 2023 году оценивался в 0,8-0,9 млрд долл. США, а прогнозируемые среднегодовые темпы роста составляют 12-19 % до 2030 года [9-11]. При этом доля энергетического сектора в общем спросе на суперконденсаторы увеличилась до ~22 %, что связано с ростом доли ВИЭ и необходимостью использования быстродействующих накопителей для компенсации динамических возмущений.

Таким образом, усиление роли суперконденсаторов в составе гибридных СНЭЭ является закономерным следствием развития распределенной генерации, ужесточения требований к качеству электроэнергии и стремления к увеличению срока службы аккумуляторных батарей.

1.3.2 Конденсаторы и суперконденсаторы

Рассмотрим принцип работы конденсаторов, их виды, а также особенности суперконденсаторов:

1) Принцип работы конденсатора.

Для понимания механизмов накопления и высвобождения электрической энергии следует рассмотреть наиболее распространенный тип конденсатора – параллельный пластинчатый конденсатор. Он состоит из двух проводящих обкладок (электродов), разделенных слоем диэлектрического материала. В качестве диэлектрика может использоваться вакуум либо твердый или жидкий изоляционный материал, обладающий способностью к поляризации под действием электрического поля.

При приложении напряжения между обкладками внутри диэлектрика возникает электрическое поле, вызывающее смещение связанных зарядов в его структуре. Поляризация диэлектрика приводит к ослаблению внутреннего электрического поля при заданном заряде, что эквивалентно увеличению емкости конденсатора. Величина емкости определяется диэлектрической проницаемостью материала, геометрическими размерами обкладок и расстоянием между ними. При этом диэлектрическая проницаемость также

влияет на предельное рабочее напряжение конденсатора, превышение которого приводит к электрическому пробое и потере работоспособности устройства.

Процесс заряда конденсатора начинается при подключении источника напряжения: под действием электрического поля свободные электроны перераспределяются в проводящих обкладках, формируя на одной пластине отрицательный заряд, а на другой – равный по модулю положительный заряд. Разность потенциалов между пластинами возрастает до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не станет равным напряжению источника. В этот момент ток в установившемся режиме прекращается, и конденсатор считается полностью заряженным. Время зарядки определяется сопротивлением цепи и величиной емкости.

После отключения источника питания конденсатор сохраняет накопленный заряд и может выступать в роли источника электрической энергии. При подключении нагрузки начинается процесс разряда, сопровождающийся протеканием тока от отрицательно заряженной пластины к положительно заряженной. Процесс разряда продолжается до тех пор, пока заряд не будет рассеян. Временные характеристики разряда, как и в случае заряда, определяются параметрами цепи [166].

Таким образом, классические конденсаторы обеспечивают высокую скорость отдачи энергии, однако обладают сравнительно малой емкостью, что существенно ограничивает их применение в задачах длительного хранения энергии;

2) Виды конденсаторов.

Существует большое разнообразие конденсаторов в зависимости от их практического применения. Основными категориями являются переменные и непеременные конденсаторы. Значение емкости переменных конденсаторов может быть изменено механически или электронно, как следует из названия, в то время как непеременные конденсаторы имеют фиксированную емкость. Конденсаторы в основном делятся на три категории, а именно электростатические, электролитические и электрохимические. Более подробно:

а) Электростатический конденсатор. Типичные электростатические конденсаторы состоят из двух тонких полосок металлической фольги в качестве электродов, разделенных диэлектриком (рисунок 1.31а). На рынке коммерчески доступны различные типы электростатических конденсаторов. Названия этих конденсаторов происходят от типа диэлектрического материала, используемого для их изготовления. Примерами различных электростатических конденсаторов являются воздушные, керамические, слюдяные и пластиковые/бумажные пленочные конденсатор;

б) Электролитический конденсатор. История электролитических конденсаторов началась в 1886 году, когда Чарльз Поллак анодировал металлы, такие как алюминий и другие металлы (рисунок 1.31б). Во время своих исследований он заметил, что между алюминием и раствором электролита существует очень высокая емкость из-за тонкого слоя оксида алюминия, образующегося во время анодирования. Электролитический конденсатор – это тип поляризованного конденсатора, положительный электрод которого изготовлен из металла, способного образовывать изолирующий слой оксида при анодировании, а в качестве отрицательного электрода используется электролит, что позволяет достичь большей емкости, чем у других типов конденсаторов. В данном случае оксидный слой является диэлектриком конденсатора.

Электролит может быть жидким, полутвердым или твердым веществом с высокой концентрацией ионов. Полярность большинства электролитических конденсаторов обусловлена тем, что напряжение на аноде, на котором образовался диэлектрический слой, всегда должно быть больше, чем напряжение на катоде. Процесс анодирования задает полярность. Поэтому необходимо следить за полярностью конденсатора в цепи. Если произойдет смена полярности, это приведет к растворению оксидного слоя, а в крайних случаях устройство может взорваться из-за перегрева электролита. На рынке представлены различные типы электролитических конденсаторов [166];

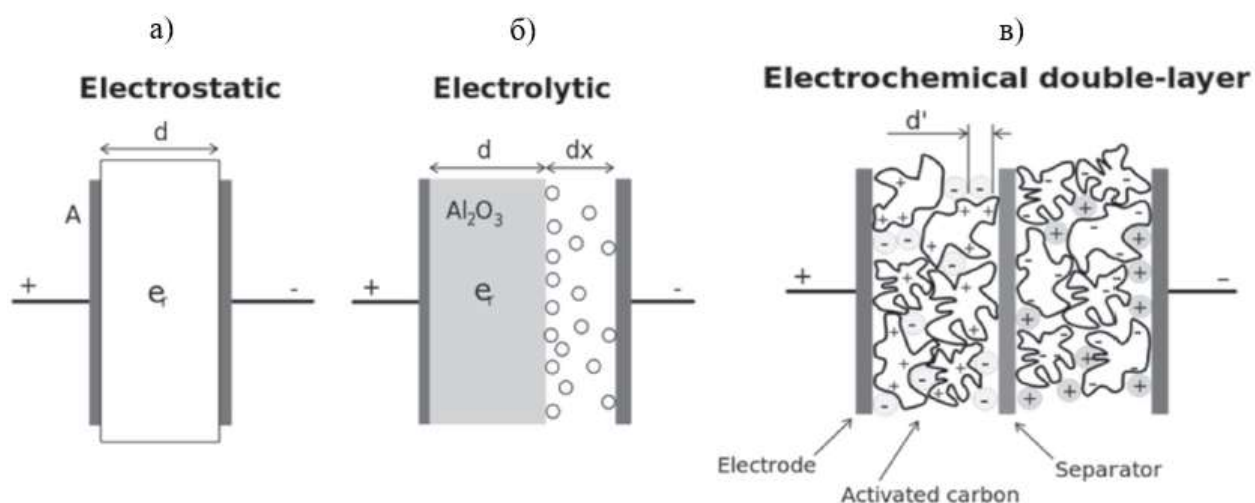


Рисунок 1.31 – Схематическое изображение различных классификаций конденсаторов:
а) – электростатический конденсатор; б) – электролитический конденсатор;
в) – суперконденсатор

в) Суперконденсатор (ионистор, электрохимический конденсатор) – это устройство для хранения электрической энергии, в котором накопление заряда осуществляется

преимущественно за счет формирования двойного электрического слоя на границе раздела электрод-электролит, что обеспечивает существенно большую емкость по сравнению с традиционными конденсаторами (рисунок 1.31в).

Согласно ГОСТ Р 57437-2017 [167], суперконденсатор определяется как конденсатор с двойным электрическим слоем либо как конденсатор, накопление заряда и энергии в котором происходит за счет образования двойного электрического слоя на поверхности электродов.

Суперконденсаторы сочетают в себе характерные свойства конденсаторов и аккумуляторных батарей: они способны обеспечивать быстрые процессы заряда и разряда, типичные для конденсаторов, при значительно большей емкости, сопоставимой с электрохимическими накопителями. При этом, в отличие от аккумуляторных батарей, суперконденсаторы не используют протекающие в объеме электродов химические реакции в качестве основного механизма хранения энергии, что обуславливает их высокий ресурс циклов и малое время отклика.

В отличие от обычных конденсаторов, суперконденсаторы не содержат твердого диэлектрика в классическом понимании. Функцию разделения зарядов выполняют электролит и пористые электроды с чрезвычайно развитой поверхностью (до 3000 м²/г), что позволяет достигать значений емкости, измеряемых сотнями и тысячами фарад.

В соответствии с требованиями российских стандартов, суперконденсаторы относятся к классу конденсаторов постоянной емкости, однако обладают специфическими электрохимическими свойствами. Это отражено в ГОСТ Р 57437-2017, где их характеристики определяются через параметры емкости, эквивалентного последовательного сопротивления и других эксплуатационных показателей [166,167];

3) Отличия суперконденсаторов.

Суперконденсаторы по ряду ключевых характеристик существенно превосходят традиционные конденсаторы, что обуславливает их применение в задачах накопления и быстрого высвобождения электрической энергии. Прежде всего это относится к емкости: для обычных конденсаторов характерны значения в диапазоне пикофарад-микрофарад, тогда как суперконденсаторы благодаря использованию пористых электродных материалов и электролита вместо твердого диэлектрика способны достигать значений емкости, измеряемых фарадами и выше. При этом, несмотря на значительно большую емкость, время заряда и разряда суперконденсаторов остается малым [168].

Существенные различия наблюдаются и по механизму хранения энергии. В обычных конденсаторах энергия запасается в электрическом поле диэлектрика между

обкладками, тогда как в суперконденсаторах накопление энергии осуществляется за счет формирования двойного электрического слоя на границе раздела электрод-электролит без участия химических реакций. Это обеспечивает более высокую удельную энергию суперконденсаторов (порядка 10-20 Вт·ч/кг) по сравнению с традиционными конденсаторами, для которых удельная энергия пренебрежимо мала.

Отличия также проявляются в напряжении и мощности. Рабочее напряжение одного элемента суперконденсатора относительно невелико и, как правило, составляет 2-3 В, однако они способны обеспечивать чрезвычайно высокую удельную мощность, достигающую 10 кВт/кг. Обычные конденсаторы, напротив, выдерживают значительно более высокие напряжения (сотни вольт), но не предназначены для работы в режимах высокой удельной мощности [169].

По циклической устойчивости и динамическим характеристикам суперконденсаторы также превосходят традиционные конденсаторы в задачах накопления энергии. Они выдерживают миллионы циклов заряда-разряда при характерных временах отклика порядка секунд и менее, в то время как обычные конденсаторы не рассчитаны на длительную эксплуатацию в роли энергонакопителей. Вместе с тем суперконденсаторы обладают более высоким саморазрядом и большей стоимостью производства по сравнению с простыми конденсаторами, что ограничивает их применение в ряде задач [170].

Существенные различия наблюдаются и при сравнении суперконденсаторов с аккумуляторными батареями, в частности литий-ионными.

Прежде всего различается механизм хранения энергии. В аккумуляторных батареях энергия запасается за счет протекания окислительно-восстановительных химических реакций, что обеспечивает высокую удельную энергию (до 250 Вт·ч/кг), однако сопровождается сравнительно медленными процессами заряда и разряда. В суперконденсаторах накопление энергии основано преимущественно на физическом процессе – электростатическом разделении зарядов в двойном электрическом слое на границе раздела электрод-электролит. Это приводит к существенно меньшей удельной энергии (обычно 5-20 Вт·ч/кг), но обеспечивает чрезвычайно высокую удельную мощность, достигающую 10 кВт/кг [171].

Существенные различия наблюдаются и по скорости заряда и разряда. Суперконденсаторы способны заряжаться и разряжаться в течение секунд и даже миллисекунд, тогда как для аккумуляторных батарей характерны временные масштабы от

минут до часов. Благодаря этому суперконденсаторы особенно эффективны при работе с кратковременными пиковыми нагрузками и быстроменяющимися режимами мощности.

Важным преимуществом суперконденсаторов является их циклическая устойчивость и срок службы. Они выдерживают сотни тысяч и даже миллионы циклов заряда-разряда без существенной деградации параметров, в то время как ресурс аккумуляторов, как правило, ограничен несколькими тысячами циклов из-за необратимых химических процессов и деградации активных материалов [172].

Суперконденсаторы характеризуются более высоким саморазрядом (до 20 % в месяц) по сравнению с аккумуляторными батареями, однако они сохраняют работоспособность в более широком температурном диапазоне (примерно от -40 до +65 °C), тогда как аккумуляторы чувствительны к перегреву и переохлаждению. С точки зрения стоимости и безопасности суперконденсаторы дороже по удельной энергии, но обладают повышенной эксплуатационной безопасностью, не склонны к тепловому разгону и считаются более экологичными [173].

В целом суперконденсаторы не заменяют аккумуляторы, а функционально дополняют их в системах, где требуется высокая мощность и быстрый отклик, а не длительное хранение энергии.

Дополнительное различие между суперконденсаторами и электрохимическими накопителями проявляется в их частотных и импедансных характеристиках. Аккумуляторные батареи, использующие диффузионные и химические процессы, обладают более медленным частотным откликом. Для них характерен рабочий диапазон частот порядка 1 мГц – 10 Гц, при этом постоянная времени отклика составляет секунды и минуты. Суперконденсаторы, напротив, демонстрируют широкий частотный диапазон – от десятков миллигерц до десятков и сотен килогерц – и малые постоянные времени (от миллисекунд до секунд), что обусловлено физической природой процессов накопления заряда.

Импеданс суперконденсаторов на низких частотах мал благодаря высокой емкости, а его рост на высоких частотах определяется эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR). Для аккумуляторов характерен сравнительно высокий импеданс на низких частотах, что ограничивает их способность отдавать большие мощности. Фазовый сдвиг тока и напряжения у суперконденсаторов близок к -90° в низкочастотной области, что соответствует почти идеальному емкостному поведению, тогда как у аккумуляторов он обычно ближе к -45° и менее, что связано с диффузионными процессами.

Благодаря этим особенностям суперконденсаторы превосходят аккумуляторы в задачах сглаживания быстрых колебаний мощности и компенсации переходных процессов, в то время как аккумуляторы более эффективны для длительного энергообеспечения.

Современные требования к энергетическим системам, рост доли возобновляемых источников энергии, а также развитие потребительской электроники стимулируют активные исследования в области совершенствования систем накопления энергии. Применение наноструктурированных материалов, новых электродных композиций и электролитов направлено на повышение удельной энергии, удельной мощности, циклической стабильности и снижение стоимости как суперконденсаторов, так и аккумуляторных батарей. При этом ни одна из существующих технологий накопления энергии не способна в одиночку удовлетворить всем требованиям по мощности, энергии, сроку службы и стоимости, что обуславливает рост интереса к гибридным системам хранения энергии, сочетающим различные типы накопителей.

Исторически развитие суперконденсаторов началось с патентов на устройства с двойным электрическим слоем в конце 1950-х годов. Использование электролитов и электродов с чрезвычайно развитой поверхностью позволило существенно увеличить емкость по сравнению с традиционными диэлектрическими и электролитическими конденсаторами. Благодаря сочетанию высокой удельной мощности, быстрого отклика и длительного срока службы суперконденсаторы нашли применение в системах, требующих кратковременных энергетических импульсов, таких как транспортные средства, подъемно-транспортное оборудование, системы рекуперации энергии и сглаживания нагрузки.

Вместе с тем суперконденсаторы обладают и рядом ограничений, включая сравнительно низкую удельную энергию, повышенный саморазряд, диэлектрическое поглощение и возможность быстрого разряда при коротком замыкании из-за малого внутреннего сопротивления. Кроме того, при высоких напряжениях заряда возможны процессы деградации и коррозии электродных материалов [166].

В зависимости от механизма накопления энергии и типа используемых электродных материалов суперконденсаторы подразделяются на несколько основных разновидностей;

4) Классификация суперконденсаторов.

В российских нормативных документах, в частности в ГОСТ Р 57437-2017, суперконденсаторы рассматриваются в составе общего класса конденсаторов и классифицируются преимущественно по материалам электродов и электрохимическим особенностям, с акцентом на параметры емкости, внутреннего сопротивления и области

применения [166,167]. В зависимости от механизма накопления энергии и типа электродных материалов суперконденсаторы принято подразделять на несколько основных разновидностей:

а) Электрические двухслойные конденсаторы (EDLC). Электрические двухслойные конденсаторы являются наиболее распространенным и коммерчески освоенным типом суперконденсаторов. Они рассматриваются как эффективные и экологически чистые накопители энергии, дополняющие или в ряде случаев заменяющие аккумуляторные батареи и топливные элементы. EDLC нашли широкое применение в электромобилях, портативной и носимой электронике, а также в стационарных системах накопления энергии благодаря сочетанию высокой удельной емкости, большого ресурса циклов, высокой удельной мощности, плавных процессов заряда и разряда и высокой обратимости.

Механизм накопления энергии в EDLC определяется процессами, протекающими на границе раздела электрод-электролит. В отличие от обычных конденсаторов, диапазон хранения заряда в которых ограничен значениями от микро- до миллифарад, суперконденсаторы данного типа обеспечивают емкости в диапазоне сотен и тысяч фарад при сохранении низкого эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) и высокой удельной мощности. По сравнению с аккумуляторными батареями EDLC демонстрируют значительно более высокую удельную мощность и высокую скорость заряда и разряда, что делает их особенно эффективными в системах с импульсными нагрузками. Их использование позволяет уменьшить габариты и массу аккумуляторных систем, повысить срок службы батарей, обеспечить балансировку источников энергии и стабильную работу в широком температурном диапазоне. Кроме того, EDLC отличаются высоким уровнем безопасности и отсутствием риска теплового разгона.

В конструкции суперконденсаторов используются различные электродные материалы, включая углеродистые материалы, оксиды и гидроксиды переходных металлов, а также проводящие полимеры. Для EDLC наибольшее распространение получили углеродные материалы благодаря их высокой удельной поверхности, химической стабильности и доступности. Морфология электродов, распределение пор, структура поверхности и тип электролита оказывают существенное влияние на электрохимические характеристики и эксплуатационные показатели устройств.

Основными конструктивными элементами EDLC (рисунок 1.31в) являются два пористых электрода, электролит и сепаратор, электрически изолирующий положительный и отрицательный электроды. Электрическая двухслойная емкость формируется за счет

пространственного разделения зарядов на границе электрод-электролит. В структуре двойного слоя выделяют компактный слой Штерна (внутренняя плоскость Гельмгольца) и диффузный слой (внешняя плоскость Гельмгольца). В процессе заряда ионы электролита мигрируют к соответствующим электродам, а электроны перемещаются по внешней цепи, что приводит к накоплению энергии в двухслойном интерфейсе. Поскольку электрохимические реакции в объеме электродов отсутствуют и накопление заряда носит физический характер, EDLC обладают чрезвычайно высокой циклической устойчивостью, достигающей миллионов циклов. В связи с этим процесс накопления энергии в EDLC рассматривается как поверхностное явление, а свойства поверхности электродных материалов играют ключевую роль в определении емкости устройства. На практике для EDLC широко применяются различные формы углерода, включая порошкообразный и пористый углерод, углеродные волокна, углеродные нанотрубки и графен;

б) Псевдоконденсаторы. В псевдоконденсаторах, также называемых фарадеевскими суперконденсаторами, механизм накопления энергии отличается от EDLC. емкость в этих устройствах формируется за счет быстрых и обратимых фарадеевских окислительно-восстановительных реакций, протекающих на поверхности или вблизи поверхности электрода. Развитие псевдоемкости связано с несколькими электрохимическими процессами, включая поверхностную адсорбцию и десорбцию ионов, окислительно-восстановительные реакции с переносом заряда и обратимое допирование проводящих полимерных материалов.

По сравнению с аккумуляторными батареями псевдоконденсаторы обеспечивают значительно более быстрые процессы заряда и разряда – от секунд до минут, что позволяет использовать их в качестве накопителей с высокой удельной мощностью и повышенной плотностью энергии. Исторически исследования в этой области были сосредоточены на благородных металлах и гидратах оксидов металлов, однако в настоящее время основное внимание уделяется оксидам переходных металлов, таким как RuO_2 , MnO_2 , V_2O_5 и Co_3O_4 , а также проводящим полимерам. Несмотря на более высокую плотность энергии по сравнению с EDLC, псевдоконденсаторы характеризуются меньшей циклической долговечностью, обусловленной структурными изменениями электродных материалов в процессе многократных циклов заряда и разряда;

в) Гибридные суперконденсаторы представляют собой устройства, в которых сочетаются механизмы электрической двухслойной емкости и псевдоемкости. Они состоят из электродов различного типа, сепаратора и электролита, а накопление энергии осуществляется одновременно за счет двухслойной адсорбции ионов и обратимых

фарадеевских реакций. В таких асимметричных конфигурациях электрод фарадеевского типа обеспечивает высокую плотность энергии, тогда как электрод EDLC-типа – высокую удельную мощность и стабильность при циклировании. Гибридные суперконденсаторы принято подразделять на асимметричные, композитные и батарейного типа, в зависимости от сочетания активных материалов и конструкции электродов;

г) Иные конфигурации суперконденсаторов. С точки зрения конструктивного исполнения одноячеечные суперконденсаторы подразделяются на симметричные, асимметричные и гибридные, при этом границы между асимметричными и гибридными конфигурациями в ряде случаев остаются дискуссионными.

Симметричные суперконденсаторы состоят из одинаковых материалов на обоих электродах и, как правило, используют углеродные материалы в сочетании с органическими электролитами. Их рабочее напряжение обычно ограничено значением около 2,7 В, что связано с электрохимической стабильностью электролита. Повышение рабочих характеристик таких устройств достигается за счет оптимального подбора материалов электродов и электролита, а также балансировки масс электродов.

В асимметричных суперконденсаторах применяются электроды различного типа, например углеродный EDLC-электрод и псевдоемкостной электрод. Одной из наиболее изученных конфигураций является сочетание активированного угля и MnO_2 .

Гибридные конденсаторы батарейного типа отличаются тем, что псевдоемкостные электроды заменяются электродами батарейного типа. В таких системах используются, в частности, никелевые соединения и PbO_2 , которые обеспечивают повышенное рабочее напряжение при относительно низкой стоимости. Однако применение батарейных электродов ограничивается их сравнительно низкой циклической стабильностью.

В литературе описано большое количество конструкций гибридных суперконденсаторов, для которых характерно батарейное поведение при малых плотностях тока разряда и конденсаторное поведение при высоких токах. Основной проблемой таких систем остается обеспечение высокой циклической стабильности, что определяет основные направления современных исследований;

5) Материалы, используемые при изготовлении суперконденсаторов.

Как было отмечено выше суперконденсаторы классифицируются не только по механизму накопления энергии, но и по типу применяемых электродных материалов, которые в значительной степени определяют их электрические характеристики и области применения:

а) Электрические двухслойные конденсаторы (EDLC).

Механизм накопления энергии. В EDLC энергия накапливается за счет электростатического разделения зарядов в двойном электрическом слое на границе электрод-электролит без участия химических реакций. Это обеспечивает высокую удельную мощность (до 10 кВт/кг) и исключительно высокую циклическую стабильность (до 10^6 циклов), однако приводит к сравнительно низкой удельной энергии (5-20 Вт·ч/кг).

Материалы:

- Электроды. Углеродные материалы с развитой удельной поверхностью (1000-3000 м²/г), включая активированный уголь, углеродные нанотрубки, графен и углеродные аэрогели. Наиболее распространенным является активированный уголь благодаря его доступности и низкой стоимости [174];

- Электролит. Органические электролиты (ацетонитрил или пропиленкарбонат с солями, например TEABF₄) либо водные растворы (KOH, H₂SO₄), обеспечивающие высокую ионную проводимость и стабильность [166];

- Сепаратор. Пористые материалы (полипропилен, целлюлоза), предотвращающие короткое замыкание между электродами;

б) Псевдоконденсаторы.

Механизм накопления энергии. В псевдоконденсаторах емкость формируется за счет быстрых и обратимых фарадеевских реакций на поверхности или вблизи поверхности электродов. Такой механизм позволяет достичь более высокой удельной энергии (20-100 Вт·ч/кг), однако сопровождается снижением циклической стабильности (10^4 - 10^5 циклов) и удельной мощности (до 5 кВт/кг) по сравнению с EDLC.

Материалы:

- Электроды. Оксиды переходных металлов (RuO₂, MnO₂, NiO, Co₃O₄) и проводящие полимеры (полианилин, полипиррол, PEDOT). Оксид RuO₂ характеризуется высокой удельной емкостью (до 1500 Ф/г), но отличается высокой стоимостью, тогда как MnO₂ является более экономичной альтернативой [174];

- Электролит. Преимущественно водные растворы (KOH, Na₂SO₄), обеспечивающие совместимость с оксидными электродами; в отдельных случаях применяются органические электролиты для повышения рабочего напряжения [166];

- Сепаратор. Аналогичен используемому в EDLC;

в) Гибридные суперконденсаторы.

Механизм накопления энергии. В гибридных суперконденсаторах сочетаются механизмы двойного электрического слоя и фарадеевских реакций за счет применения асимметричных электродов (например, углеродного и оксидного). Такая конфигурация

позволяет достичь компромисса между удельной энергией (10-50 Вт·ч/кг), удельной мощностью (до 8 кВт/кг) и ресурсом циклов (10^5 - $5 \cdot 10^5$).

Материалы:

- Электроды. Композитные материалы на основе сочетаний графена и MnO_2 , углеродных нанотрубок и NiO , углерода и проводящих полимеров. Как правило, один электрод реализует EDLC-механизм, а второй – фарадеевский механизм накопления энергии [174];

- Электролит. Водные или органические электролиты, оптимизированные под асимметричную конфигурацию электродов [166];

- Сепаратор. Аналогичен применяемому в EDLC и псевдоконденсаторах;

6) Проектные характеристики суперконденсаторов.

Проектные характеристики суперконденсаторов определяют их эффективность, надежность и области практического применения. К ключевым параметрам относятся рабочее напряжение ячейки, частотный отклик, температурные и влажностные условия эксплуатации, полярность, срок службы, циклическая стабильность, энергетическая и кулоновская эффективность, а также эквивалентное последовательное сопротивление (ESR). Комплексный учет указанных характеристик необходим для обеспечения оптимальной производительности накопителя энергии в реальных условиях эксплуатации. Рассмотрим основные виды характеристик:

а) Напряжение ячейки.

В отличие от аккумуляторных батарей, суперконденсаторы способны эффективно работать в широком диапазоне напряжений – от номинального значения до практически нулевого уровня. Номинальное напряжение отдельной ячейки определяется электрохимической стабильностью электродов и типом применяемого электролита. Запасаемая энергия описывается выражением:

$$E = \frac{1}{2} * C * V^2, \quad (1.1)$$

из которого следует, что плотность энергии пропорциональна квадрату рабочего напряжения.

Тип используемого электролита оказывает определяющее влияние на допустимый диапазон напряжений: для водных электролитов он составляет порядка 1,0-1,5 В, тогда как органические электролиты позволяют повысить рабочее напряжение отдельной ячейки до

2,7-3,0 В. В практических системах суперконденсаторы обычно формируются в виде модулей, содержащих несколько последовательно соединенных ячеек с номинальным напряжением 2,7 В каждая.

Следует отметить, что длительная эксплуатация суперконденсатора при напряжениях, близких к верхнему допустимому пределу, ускоряет деградацию электролита и сокращает срок службы устройства. Степень деградации определяется величиной приложенного напряжения и временем его воздействия. Кратковременные перенапряжения, как правило, не приводят к немедленному отказу, однако систематическое превышение номинальных значений существенно снижает ресурс элемента [166];

б) Балансировка ячеек.

Для крупномасштабных энергетических систем одной ячейки суперконденсатора недостаточно, поэтому применяется последовательное соединение нескольких элементов. При этом из-за технологического разброса параметров (емкость отдельных ячеек может отличаться на $\pm 20\%$) возникает дисбаланс напряжений, что приводит к неравномерному распределению нагрузки и ускоренной деградации отдельных ячеек.

Для устранения этого эффекта используются схемы балансировки напряжений, которые подразделяются на пассивные и активные. При пассивной балансировке к каждой ячейке параллельно подключается резистор, компенсирующий различия в токах утечки. Такой подход отличается простотой и низкой стоимостью, однако сопровождается дополнительными потерями энергии. В соответствии с рекомендациями по проектированию, ток через балансирующий резистор должен как минимум в 50 раз превышать максимальный ток утечки ячейки. Увеличение сопротивления снижает потери мощности, но замедляет процесс выравнивания напряжений, что ограничивает область применения пассивной балансировки системами с низким рабочим циклом.

Активная балансировка применяется в системах с высокой интенсивностью циклов заряда-разряда и ограниченными энергетическими ресурсами. В таких схемах перераспределение энергии между ячейками осуществляется с помощью операционных усилителей или специализированных интегральных микросхем. Хотя активные схемы более сложны и дороги, они обеспечивают существенно меньшие потери энергии в установившемся режиме и более высокую надежность при длительной эксплуатации [166];

в) Частотный отклик.

Частотный отклик суперконденсатора характеризует его способность реагировать на изменения тока и напряжения во времени и определяется постоянной времени:

$$\tau = R * C, \quad (1.2)$$

которая соответствует времени достижения 63,2 % напряжения при зарядке или разряда до 36,8 % при разряде.

В зависимости от свойств электродных материалов, типа электролита и конструкции ячейки постоянная времени суперконденсаторов лежит в диапазоне от миллисекунд до секунд. Это обеспечивает возможность их применения в импульсных энергетических системах, где требуется быстрый отклик при минимальных потерях мощности [166].

В соответствии с ГОСТ Р 62391-1-2023 [175], частотный отклик определяется как частотная зависимость импеданса накопителя энергии и является важным параметром при анализе динамических режимов работы. На низких частотах (мГц-Гц) поведение суперконденсатора преимущественно емкостное, тогда как на высоких частотах (кГц-МГц) доминирует резистивная составляющая, связанная с ESR. Экспериментально частотный отклик определяется методом электрохимической импедансной спектроскопии (EIS);

г) Рабочая температура.

Суперконденсаторы обладают широким температурным диапазоном эксплуатации, как правило, от -40 до +65 °С, что делает их пригодными для использования в различных климатических условиях. Органические электролиты имеют более низкую температуру замерзания и предпочтительны для эксплуатации при отрицательных температурах.

Изменение температуры практически не влияет на емкость, поскольку накопление заряда носит физический характер. Однако подвижность ионов в электролите существенно зависит от температуры, что приводит к увеличению ESR при ее снижении. Повышенные температуры, в свою очередь, ускоряют процессы деградации и могут снижать срок службы устройства [166];

д) Полярность.

Симметричные электрические двухслойные суперконденсаторы теоретически не имеют выраженной полярности, поскольку их электроды выполнены из одинаковых материалов. Тем не менее для удобства монтажа и эксплуатации полярность выводов указывается производителем.

В асимметричных и гибридных суперконденсаторах материалы анода и катода различаются, вследствие чего полярность становится критически важной. Нарушение рекомендованной полярности может привести к снижению ресурса и ухудшению характеристик устройства, поэтому маркировка выводов является обязательной [166];

е) Срок службы и циклическая стабильность.

По сравнению с аккумуляторными батареями суперконденсаторы обладают значительно большим ресурсом циклов заряда-разряда. Срок службы элемента считается исчерпанным, если его емкость снижается на 30 %, а внутреннее сопротивление удваивается по сравнению с номинальным значением.

Коммерческие суперконденсаторы способны выдерживать более 500 000 циклов при незначительной деградации параметров. Кулоновская эффективность, определяемая отношением отданного заряда к принятому, может приближаться к 100 %, однако высокая кулоновская эффективность не всегда эквивалентна максимальной энергетической эффективности из-за потерь на ESR [166];

ж) Влажность и условия хранения.

Суперконденсаторы допускают эксплуатацию при высокой влажности, однако после вскрытия вакуумной упаковки рекомендуется использовать изделия в течение ограниченного срока. Длительное воздействие влаги может привести к окислению выводов и ухудшению электрического контакта. В случае необходимости допускается аккуратная механическая очистка окисленных поверхностей с соблюдением мер безопасности [166];

и) Эффективность и эквивалентное последовательное сопротивление.

Энергетическая эффективность суперконденсаторов в большинстве режимов эксплуатации достигает 90 % и выше. Основные потери обусловлены эквивалентным последовательным сопротивлением, которое приводит к тепловым потерям по закону Джоуля-Ленца.

ESR представляет собой суммарное сопротивление электродов, электролита, сепаратора, токосъемников и контактных соединений. его значение обычно составляет от нескольких до десятков миллиом, что делает данный параметр критически важным при работе с высокими токами. Удельная мощность суперконденсатора определяется выражением:

$$P = \frac{V^2}{4 * ESR}, \quad (1.3)$$

что подчеркивает ключевую роль ESR в проектировании энергетических систем [166,175].

1.3.3 Моделирование EDLC-конденсаторов

При контакте заряженного твердого электрода с жидким электролитом на границе их раздела формируется электрический двойной слой (EDL), обусловленный перераспределением зарядов. Ионы электролита противоположного знака концентрируются вблизи поверхности электрода, компенсируя его заряд, что приводит к возникновению емкостного эффекта без протекания объемных химических реакций. Именно механизм образования и поведения электрического двойного слоя лежит в основе работы электрических двухслойных конденсаторов (EDLC).

Физическая природа EDL и взаимодействие между поверхностью электрода и ионами электролита описываются рядом теоретических моделей. В настоящее время наибольшее распространение получили три классические модели [166]:

а) Модель Гельмгольца. Герман фон Гельмгольц предположил, что при контакте электрода с электролитом ионы с противоположным зарядом притягиваются, а ионы с одинаковым зарядом отталкиваются. Это приводит к образованию двух слоев на границе раздела электрод/электролит и называется электрическим двойным слоем. Этот двойной электрический слой можно рассматривать как молекулярный диэлектрик, способный накапливать электрический заряд;

б) Модель Гуи-Чепмена или диффузионная модель. Согласно Луи Жоржу Гуи и Дэвиду Леонарду Чепмену, величина емкости зависит как от концентрации ионов, так и от приложенного потенциала. Согласно этой модели, заряженная поверхность окружена равным количеством противоположно заряженных ионов из раствора, но эти ионы не привязаны к заряженной поверхности, как это описано в модели Гельмгольца, а свободно перемещаются. Поэтому такой слой противоположно заряженных ионов называется диффузным двойным слоем. Кинетическая энергия ионов в растворе является одним из критических факторов, определяющих толщину этого слоя;

в) Модель Штерна. Эта модель сочетает в себе особенности модели Гельмгольца и модели Гуи-Чепмена. Согласно модели Штерна, некоторые ионы жестко прикреплены к поверхности электрода, как в модели Гельмгольца, что называется слоем Штерна, в то время как другие образуют диффузный слой, предложенный Гуи и Чепменом. В модели Гуи-Чепмена ионы рассматриваются как точечные заряды, и для них не существует ограничений на приближение к поверхности электрода.

Из-за принципиального отличия механизма накопления энергии в EDLC от диэлектрических конденсаторов, классические модели параллельных пластинчатых конденсаторов не позволяют адекватно описать их поведение. В суперконденсаторах емкость и сопротивление распределены в объеме пористых электродов, а процессы заряда и разряда носят нелинейный и частотно-зависимый характер. В связи с этим для их анализа используются специальные эквивалентные электрические модели [166]:

а) Классическая эквивалентная схема (рисунок 1.32а). Наиболее простой и широко применяемой моделью является классическая эквивалентная схема EDLC, в которой суперконденсатор представлен идеальной емкостью, последовательно соединенной с эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) и параллельно соединенной с эквивалентным сопротивлением утечки (EPR). ESR моделирует омические потери в электролите, электродах и токосъемниках, тогда как EPR описывает ток утечки при длительном хранении энергии.

Данная модель адекватно описывает поведение EDLC только в низкочастотной области и при установившихся режимах. Для анализа динамических процессов в широком диапазоне частот требуются более сложные модели;

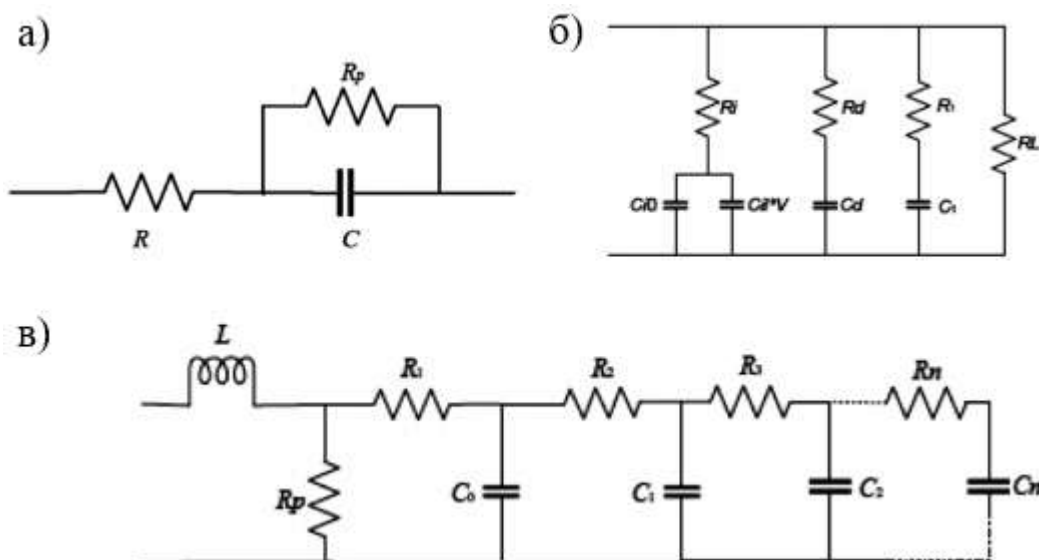


Рисунок 1.32 – Классическая эквивалентная схема (а), модель трех ветвей (б) и модель линии передачи (с), представляющие EDL

б) Модель трех ветвей (рисунок 1.32б) предназначена для более точного описания динамики перераспределения заряда в пористых электродах. Она включает три RC-ветви, каждая из которых характеризуется собственной постоянной времени и отражает процессы, протекающие на различных временных масштабах.

Первая (непосредственная) ветвь с наименьшей постоянной времени определяет поведение при быстрых процессах заряда и разряда (порядка секунд). В этой ветви используется нелинейная емкость, зависящая от напряжения, что позволяет учитывать зависимость емкости EDLC от уровня смещения.

Вторая ветвь моделирует процессы со средней временной задержкой (несколько минут) и отражает более глубокое проникновение ионов в пористую структуру электрода.

Третья ветвь описывает медленные процессы, связанные с саморазрядом и перераспределением заряда на временных интервалах, превышающих десятки минут. Дополнительно в модель включается резистор утечки.

Параметры модели, как правило, идентифицируются методом Зубиеты, при котором суперконденсатор подвергается быстрому контролируемому заряду. Экспериментально показано, что модель трех ветвей обеспечивает удовлетворительную точность для временных интервалов до 30 с при напряжениях выше 40 % от номинального;

в) Теория пористого электрода. В рамках теории пористого электрода, разработанной де Леви, предполагается, что электрод состоит из большого числа идентичных, не связанных между собой цилиндрических пор. Каждая пора характеризуется распределенным сопротивлением электролита и емкостью двойного слоя. В этом случае импеданс одной поры считается репрезентативным для всего электрода.

Такая модель позволяет аналитически связать импеданс EDLC с геометрией пор, проводимостью электролита и характеристиками поверхности электрода, что особенно важно при анализе электрохимических процессов в высокопористых материалах;

г) Модель линии передачи (Transmission Line Model, TLM). Модель линии передачи (рисунок 1.32в) является развитием теории пористого электрода и учитывает распределенный характер сопротивления и емкости вдоль глубины пор. Каждая пора моделируется как линия передачи, в которой сопротивление электролита распределено вдоль длины поры, а емкость двойного слоя – по ее поверхности.

При приложении постоянного потенциала глубина проникновения ионов в поры увеличивается с течением времени, тогда как при воздействии переменного сигнала глубина проникновения обратно пропорциональна частоте. Это позволяет адекватно описывать как кратковременные, так и долговременные процессы.

Основным преимуществом TLM является ее физическая наглядность и возможность моделирования EDLC в широком диапазоне частот. Кроме того, данная

модель хорошо интегрируется с численными методами и программными средствами схемотехнического и мультифизического моделирования.

1.3.4 Сферы использования суперконденсаторов

Электрические двухслойные конденсаторы являются наиболее распространенным типом суперконденсаторов, составляя около 80-90 % глобального рынка суперконденсаторов благодаря простоте конструкции, высокой цикличности (до 1 миллиона циклов) и относительно низкой стоимости по сравнению с псевдоконденсаторами или гибридными типами. Согласно отчету, рынок EDLC-суперконденсаторов оценивался в USD 2,4 миллиарда в 2023 году и прогнозируется к росту до USD 7,3 миллиарда к 2032 году с среднегодовым темпом роста (CAGR) около 13-15 % [176]. Другие оценки подтверждают эту тенденцию: общий рынок суперконденсаторов, где EDLC доминируют, достиг USD 1,19 миллиарда в 2024 году и ожидается рост до USD 1,35 миллиарда в 2025 году с CAGR 14-18 % [177]. Популярность EDLC обусловлена их способностью обеспечивать быструю отдачу энергии, что делает их идеальными для использования в условиях, требующих пиковой мощности, в отличие от аккумуляторов с более медленным откликом.

Благодаря высокой удельной мощности (до 10 кВт/кг) и низкому эквивалентному последовательному сопротивлению (ESR) EDLC широко применяются в различных отраслях. Основные сферы применения включают [166,174]:

- Энергетика (около 50 % рынка). Используются для стабилизации электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), в системах бесперебойного питания и микросетях для сглаживания колебаний мощности. Частота использования высока в проектах с гибридными СНЭ, где EDLC интегрируются с аккумуляторами для обработки пиковых нагрузок. Например, EDLC применяются в более чем 70 % проектов ВИЭ для обеспечения стабильности [166];

- Транспорт (20-30 % рынка). Используются для регенеративного торможения в электромобилях и гибридных транспортных средствах, а также в системах «старт-стоп» для экономии топлива (до 10 %). EDLC популярны в общественном транспорте (трамваи, автобусы) благодаря быстрой зарядке [178];

- Электроника (30 % рынка). Применяются в потребительских устройствах (смартфоны, камеры, носимые гаджеты), IoT-датчиках и портативных накопителях энергии. Рост частоты применения обусловлен миниатюризацией и низким саморазрядом [179]. EDLC используются в более чем 50 % IoT-устройств;

– Промышленность и др. (10-20 % рынка). Применяются в робототехнике, лифтах, медицинском оборудовании и военной технике для обеспечения пиковой мощности. 40-50 % EDLC используются в системах резервного питания и автоматизации [174].

В целом, популярность EDLC обусловлена их экологичностью, долговечностью и интеграцией в «зеленые» технологии, с прогнозируемым доминированием на рынке до 2030 года [180]. По сравнению с псевдоконденсаторами и гибридными суперконденсаторами, EDLC более популярны из-за их стабильности и меньшей стоимости, хотя они и уступают гибридным в энергоемкости [166].

1.3.5 Роль суперконденсаторов в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии

Анализ практического опыта применения СК в распределенных и автономных энергетических комплексах показывает, что именно в ВИЭ-системах с высокой долей солнечной и ветровой генерации СК демонстрируют максимальную эффективность. Колебания солнечной радиации и скорости ветра создают быстрые, стохастические изменения мощности, которые плохо компенсируются аккумуляторами из-за ограничений по их допустимым токам и скорости отклика. СК же позволяют эффективно сглаживать такие быстрые флуктуации [160].

В таблице 1.11 представлены ключевые преимущества применения СК в энергетических системах различных уровней мощности, с акцентом на распределенные энергокомплексы на основе ВИЭ [157,163,181–183].

Как видно из таблицы, ключевым преимуществом СК во всех классах энергосистем является их способность мгновенно реагировать на динамические изменения режима работы. Это позволяет значительно улучшить качество электроэнергии и повысить общую устойчивость работы энергетического комплекса независимо от уровня мощности.

Как уже было отмечено ранее, применение СК является особенно актуальным в системах с высокой долей ВИЭ, где характерны быстрые нерегулярные изменения генерации. В таких условиях СК не просто дополняют АКБ – они позволяют реализовать полноценное разделение функций: АКБ обеспечивают длительное хранение энергии, тогда как СК берут на себя «быструю» составляющую режима. Такая архитектура признана наиболее эффективной в распределенных энергосистемах по результатам исследований NREL, Fraunhofer ISE и др. [152,184].

Таблица 1.11 – Ключевые преимущества применения СК в энергетических системах различной мощности

Класс энергосистемы	Малая (до десятков кВт)	Средняя (десятки – сотни кВт)	Крупная (МВт и выше)
Примеры энергосистем	Домовые микросистемы, автономные энергокомплексы на основе ВИЭ	Микросети с ВИЭ, гибридные ветро- и солнечно-дизельные энергокомплексы	Ветроэлектростанции, солнечные электростанции, энергетические кластеры
Основные преимущества от применения СК	<ul style="list-style-type: none"> – Очень быстрый отклик (быстрый заряд/разряд; – Продление срока службы АКБ/защита АКБ от пиковых нагрузок; – Надежность и долговечность (большое количество циклов) 	<ul style="list-style-type: none"> – Стабилизация напряжения и частоты при переменной выработке ВИЭ; – Снижение нагрузки на генераторы и АКБ при пиковых режимах; – Повышение гибкости гибридных СНЭЭ (СК + АКБ) 	<ul style="list-style-type: none"> – Мгновенная компенсация резких изменений выработки/потребления, повышение устойчивости сети; – Снижение времени использования резервных генераторов и уменьшение затрат на обслуживание; – Высокая долговечность и минимальное обслуживание (особенно важно для крупномасштабных энергосистем)
Примечание	Энергия хранится сравнительно недолго, поэтому СК чаще работают в роли буфера, а не основной емкости	СК выступают как компонент системы, но не столько как накопитель большой энергии, сколько как средство мгновенного отклика	Ограничения по энергоемкости (СК не заменяют АКБ для длительного хранения электроэнергии) – этот момент важно учитывать при проектировании

При этом следует отметить, что эффективность использования СК в распределенных ВИЭ-системах напрямую зависит от того, каким образом они интегрируются в сеть и как настроены элементы силовой электроники.

1.3.6 Схемы включения суперконденсаторов в энергетические системы

Эффективность применения СК в распределенных энергетических системах существенно зависит от топологии их подключения к шине постоянного тока или к АКБ. В литературе и практических реализациях выделяют три базовые схемы включения: пассивную, полуактивную и активную (см. а), б) и в) на рисунке 1.33 соответственно) [185–187]. Краткая характеристика каждой топологии приведена в таблице 1.12 [188–193].

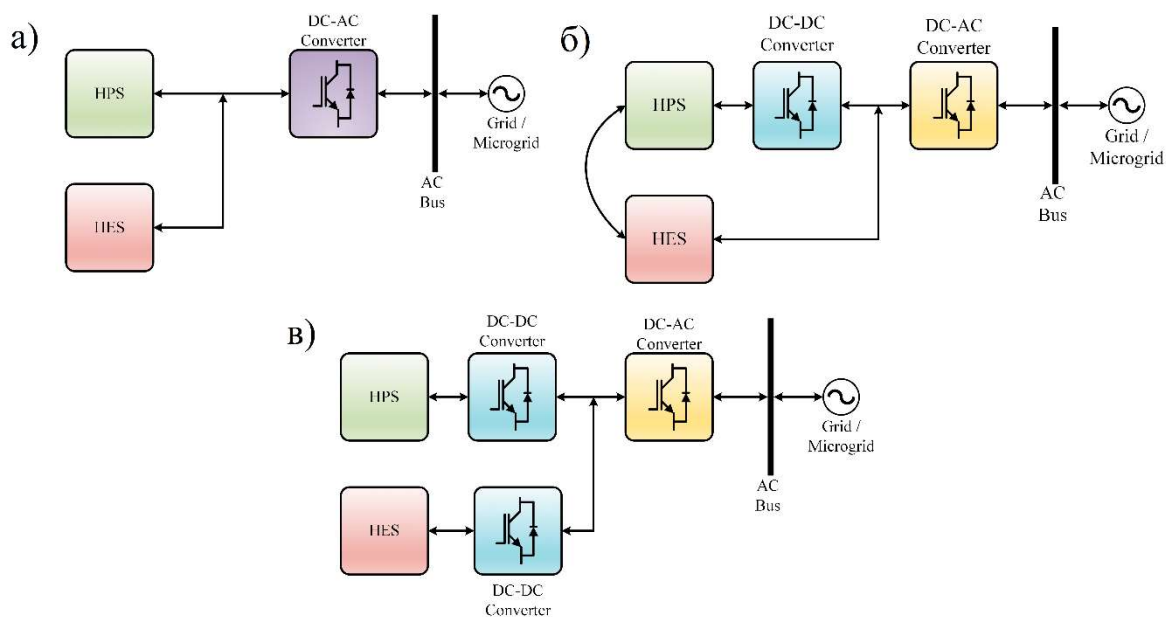


Рисунок 1.33 – Пассивная (а), полуактивная (б) и активная (в) схемы включения СК в энергетические системы

Таблица 1.12 – Особенности различных схем включения СК в энергетические системы

Параметр / Схема включения	Пассивная	Полуактивная	Активная
Наличие преобразователей	Нет	Один двунаправленный DC/DC-преобразователь (СК)	Два двунаправленных DC/DC-преобразователя (СК и АКБ)
Управление	Очень простое	Среднее (контроллер для СК)	Сложное (координация, оптимизация)
Снижение пикового тока АКБ	~10-30 %	~30-50 %	~40-70 %
Стабильность напряжения	Улучшение на ~20-40 %	Улучшение на ~30-55 %	Улучшение на ~40-60 %
Продление ресурса АКБ	~10-25 %	~20-40 %	~30-50 %
Энерго-эффективность	Максимальная	Средняя (потери в DC/DC-преобразователе)	Минимальная, но компенсируется эксплуатационными выгодами
Капитальные и операционные затраты	Минимальные	Средние	Высокие
Сложность интеграции	Низкая	Средняя	Высокая
Применение	Малые автономные объекты, бюджетные решения	Микросети с ВИЭ, гибридные ветро- и солнечно-дизельные энергокомплексы	Крупные сетевые решения, критичные объекты

1.3.7 Пассивная схема

Пассивная схема включения суперконденсаторов является наиболее простой архитектурой гибридных систем накопления энергии и широко применяется в малых распределённых системах с возобновляемыми источниками энергии. В данной топологии

аккумуляторные батареи и суперконденсаторы подключаются непосредственно и параллельно к общей шине постоянного тока или нагрузке без использования силовых преобразователей (см. рисунок 1.33а). Обязательным условием такого подключения является согласование номинальных и рабочих уровней напряжения накопителей с напряжением шины постоянного тока или питаемой нагрузки.

Распределение мощности между накопителями в пассивной архитектуре определяется исключительно их внутренними импедансами и выходными характеристиками и носит неуправляемый характер. По принципу действия такая схема аналогична параллельной работе синхронных генераторов, где нагрузка распределяется в зависимости от соотношения их внутренних сопротивлений. В гибридной системе «АКБ-СК» суперконденсаторы, обладающие значительно меньшим импедансом, принимают на себя кратковременные импульсы высокой мощности и сглаживают быстрые переходные процессы. Таким образом, СК выполняют функцию высокомоощного буфера энергии, снижая динамические токовые нагрузки на аккумуляторные батареи.

К основным преимуществам пассивной топологии относятся конструктивная простота, высокая надёжность и отсутствие сложной силовой электроники, что особенно важно для автономных и удалённых энергетических установок. Однако данная архитектура обладает рядом существенных ограничений. К ним относятся отсутствие возможности активного управления потоками мощности, высокая чувствительность к разбросу напряжений и внутренних сопротивлений накопителей, а также зависимость распределения нагрузки от температуры и текущего состояния заряда. Кроме того, прямое электрическое соединение элементов СНЭЭ повышает уязвимость системы к каскадным отказам при аварийных режимах или непредвиденных перегрузках.

Первоначально пассивная архитектура применялась преимущественно для питания импульсных нагрузок и в автомобильных гибридных системах «батарея-СК», где требовалась компенсация кратковременных пиков мощности. В дальнейшем данная топология была адаптирована для использования в энергетических системах и, в последние годы, в изолированных микросетях с высокой долей ВИЭ для сглаживания прерывистой генерации. Тем не менее, несмотря на простоту реализации, пассивная схема не получила широкого распространения в системах средней и высокой мощности вследствие следующих ограничений [185]:

- отсутствие гибкости управления и невозможность целенаправленного распределения мощности между накопителями,

- уязвимость элементов СНЭ к каскадным отказам вследствие прямого подключения к общей шине,

- необходимость строгого согласования рабочих напряжений АКБ, СК и шины постоянного тока (или нагрузки).

1.3.8 Полуактивная схема

Полуактивная схема дополняет пассивную одним двунаправленным DC/DC-преобразователем, управляющим СК (см. рисунок 1.33б). Это обеспечивает частичную управляемость потоками мощности: высокочастотные пики через преобразователь обрабатывает СК, а основная энергия поступает от АКБ. СК в этой схеме могут быть оптимально «перегружены» для работы с импульсами. Однако прямое подключение АКБ вызывает изменения напряжения на шине постоянного тока, а преобразователь должен выдерживать резкие пусковые токи.

Топология применяется для подавления флуктуаций малых ВИЭ, продления ресурса АКБ и стабилизации микросетей. Недостатки – необходимость в мощном DC/DC-преобразователе и частичное ограничение гибкости [185].

1.3.9 Активная схема

Активная схема использует отдельные двунаправленные DC/DC-преобразователи для СК и АКБ, обеспечивая полное раздельное управление обоими накопителями (см. рисунок 1.33в). Такая схема обладает максимальной гибкостью: возможна оптимальная стратегия распределения мощности, независимая регулировка напряжений и токов, использование широкого набора алгоритмов управления.

Активная топология обеспечивает лучшую компенсацию переходных процессов, сглаживание флуктуаций ВИЭ и повышение качества электроэнергии. Недостатки – высокая стоимость и потери на преобразование [185].

1.4 Предварительное математическое моделирование

1.4.1 Моделирование резкопеременной нагрузки

Как было показано выше, наиболее распространенным видом резкопеременной нагрузки являются асинхронные двигатели.

Асинхронные двигатели (АД) сами по себе не являются резкопеременной нагрузкой, так как в установившемся режиме работы их характеристики достаточно стабильны. Однако они могут создавать резкопеременную нагрузку на сеть в определенных режимах, прежде всего – во время прямого пуска. Как известно, этот режим характеризуется следующими показателями:

- бросок тока: $5...8 * I_{ном}$ за $0,1...0,3$ с;

- мощность скачок в 4-6 раз;
- длительность – 0,5...10 секунд;
- просадка напряжения до 20-30 % в маломощных сетях и может быть определена по формуле (1.4):

$$\Delta U = \frac{S_{\text{пуск}}}{S_{\text{ген}}} * X''_d * 100 \%, \quad (1.4)$$

где $S_{\text{пуск}}$ – максимальная потребляемая АД мощность при запуске;

$S_{\text{ген}}$ – номинальная мощность генератора или инвертора, питающего устройства (сравнение источников энергии, применяемых в составе СДК см. в таблице 1.13);

X''_d – сопротивление системы.

Дизель-генераторные установки обладают существенной инерцией, а высокая допустимая перегрузка по току (кратковременная) обеспечивает возможность питания двигательной нагрузки. Однако стоит отметить, что пуск АД помимо высоких пусковых токов также сопровождается снижением напряжения на питающих шинах, что может привести к невозможности осуществления запуска АД и срабатыванию защит на дизель-генераторной установке.

При питании двигательной нагрузки от инверторов, практически безинерционным, а также крайне малым внутренним сопротивлением, падения напряжения практически не наблюдается. Однако инверторы, в отличие от ДГУ, обладают меньшей перегрузочной способностью и при запуске АД могут «уходить в аварию» при превышении допустимых значений тока.

Таблица 1.13 – Особенности источников энергии в СДК

Параметр	Дизельный генератор	Инвертор
Природа источника	Вращающаяся масса, синхронная машина	Полупроводниковый преобразователь (IGBT-транзисторы)
Внутреннее сопротивление	Обусловлено индуктивностью обмоток ($X''_d \sim 0,1-0,25$ о.е.)	Чрезвычайно мало (определяется потерями в ключах и дросселях). Просадка напряжения при этом будет минимальной (1-3 %)

Продолжение таблицы 1.13

Параметр	Дизельный генератор	Инвертор
Реакция на нагрузку	Инерционная Падение частоты и напряжения при скачке нагрузки.	Практически мгновенная Скорость реакции определяется системой управления (ШИМ, ~кГц)
Ограничение по току	Определяется тепловой стойкостью обмоток и системой возбуждения. Перегрузка возможна кратковременно (секунды).	Определяется номинальным током полупроводниковых ключей. Превышение приводит к немедленному аварийному отключению (миллисекунды)
Пусковая способность	Высокая (может отдать ток в 3-7 раз выше номинального).	Ограничена паспортным значением максимального пикового или кратковременного тока (обычно $1,5-2,5 \cdot I_{ном}$ на несколько секунд)
Критерий проверки возможности пуска АД	Просадка напряжения $\Delta U < 10 \%$	Проверка способности инвертора обеспечить требуемый пусковой ток без перехода в защиту

Таким образом, при оценке влияния резкопеременной нагрузки на режим работы СДК необходимо проводить проверку возможности пуска АД по двум критериям:

- возникающая просадка напряжения,
- соотношение величины пускового тока и максимально допустимого тока инвертора,

и, исходя из полученных результатов, выбирать режим функционирования оборудования СДК.

Для остальных элементов локальной энергетической системы эти явления могут приводить к срабатыванию защит от перегрузки и создавать помехи для чувствительного оборудования.

Несмотря на то, что теоретические положения таких расчетов достаточно хорошо известны, реализация вычислительных алгоритмов до сих пор встречает определенные трудности, особенно при невозможности использования коммерческих программных продуктов. В данной работе моделирование пуска асинхронного двигателя выполнено с помощью python-библиотеки Gym Electric Motor, и включает следующие шаги:

- 1) Задание паспортных данных АД.

Моделирование запуска двигателя проведено для примеров населенных пунктов Хонуу и Кулун-Елбют (республика Саха (Якутия), в которых существует централизованное теплоснабжение от котельных и планируется модернизация котельных и установка насосного оборудования марки WILO CronoLine-IL 100/170-22/2-IE3 с техническими характеристиками, приведенными в таблице 1.14;

Таблица 1.14 – Технические характеристики насосного агрегата WILO CronoLine-IL 100/170-22/2-IE3

Параметр	Значение
	Насос WILO CronoLine-IL 100/170-22/2-IE3
Номинальная мощность, Вт	22000
Номинальное линейное напряжение, В	400
Номинальный линейный ток, А	39,1
Номинальная частота, Гц	50
Номинальный КПД при 100 % загрузки, %	92,7
Номинальная скорость вращения, об/мин	2900
Номинальное скольжение, о.е.	0,033
Номинальный момент, Нм	72,443
Число пар полюсов	1

2) Расчет параметров схемы замещения АД.

Симуляция работы асинхронного двигателя основана на использовании схемы замещения. Как правило для используется Т-образная схема замещения асинхронного двигателя, представленная на рисунке 1.34. В библиотеке Gym Electric Motor она используется в качестве базовой модели, поскольку она относительно легко позволяет учесть магнитное насыщение;

3) Математическое описание асинхронного двигателя (при условии пренебрежения потерями в стали, что вполне допустимо) проводится на основе Т-образной схемы замещения (рисунок 1.34).

Параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя следующие:

- R_s – сопротивление статора,
- R_r – приведенное сопротивление ротора,
- $L_{\sigma s}$ – индуктивность рассеяния статора,
- $L_{\sigma r}$ – приведенная индуктивность рассеяния ротора,

– L_m – индуктивность намагничивания.

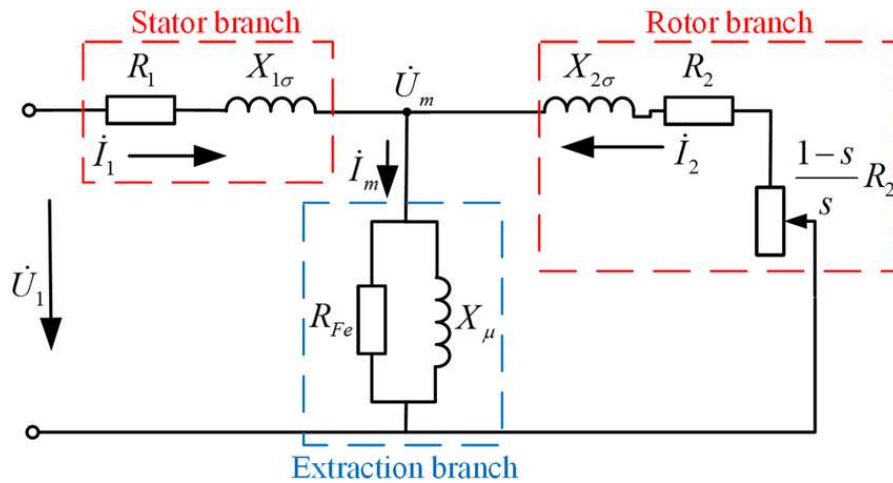


Рисунок 1.34 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Индуктивность статора и ротора определяется суммой индуктивности рассеяния и индуктивности намагничивания (см. формулы (1.5)).

$$\begin{aligned} L_s &= L_m + L_{\sigma s}; \\ L_r &= L_m + L_{\sigma r}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Модель электромагнитных и электромеханических процессов асинхронного двигателя описывается следующими уравнениями:

1) Уравнения напряжений статора и ротора:

– Статор – см. формулы (1.6):

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_s * i_{sd} + d\psi_{sd}/dt - \omega_k * \psi_{sq}; \\ u_{sq} &= R_s * i_{sq} + d\psi_{sq}/dt + \omega_k * \psi_{sd}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

– Ротор – см. формулы (1.7) (приведенные величины, для двигателя с короткозамкнутым ротором $u_{rd} = u_{rq} = 0$):

$$\begin{aligned} 0 &= R_r * i_{rd} + d\psi_{rd}/dt - (\omega_k - \omega_r) * \psi_{rq}; \\ 0 &= R_r * i_{rq} + d\psi_{rq}/dt + (\omega_k - \omega_r) * \psi_{rd}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где u_{sd} , u_{sq} – проекции вектора напряжения статора на оси d и q ;

i_{sd} , i_{sq} – проекции вектора тока статора;

i_{rd}, i_{rq} – проекции вектора тока ротора;
 R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора;
 ψ_{sd}, ψ_{sq} – проекции вектора потокосцепления статора;
 ψ_{rd}, ψ_{rq} – проекции вектора потокосцепления ротора;
 ω_k – скорость вращения системы координат;
 ω_r – электрическая скорость вращения ротора ($\omega_r = p * \Omega_p$, где p – число пар полюсов; Ω_p – механическая скорость);

2) Уравнения потокосцеплений.

Связь между токами и потокосцеплениями задается через индуктивности:

– Статор – см. формулы (1.8):

$$\begin{aligned}\psi_{sd} &= L_s * i_{sd} + L_m * i_{rd}; \\ \psi_{sq} &= L_s * i_{sq} + L_m * i_{rq}.\end{aligned}\tag{1.8}$$

– Ротор – см. формулы (1.9):

$$\begin{aligned}\psi_{rd} &= \psi_r = (L_m / (T_r * s + 1)) * i_{sd}; \\ \psi_{rq} &= 0,\end{aligned}\tag{1.9}$$

где L_s – индуктивность статора ($L_s = L_m + L_{os}$);
 L_r – индуктивность ротора ($L_r = L_m + L_{or}$);
 L_m – взаимная (намагничивающая) индуктивность;
 L_{os}, L_{or} – индуктивности рассеяния статора и ротора;
 $T_r = L_r / R_r$ – постоянная времени ротора;
 s – оператор Лапласа;

3) Уравнение электромагнитного момента.

Момент можно выразить через различные комбинации потокосцеплений и токов.

Условие: $\psi_{rd} = \psi_r$; $\psi_{rq} = 0$ (см. формулу (1.10)):

$$M = (3/2) * p * (L_m / L_r) * \psi_{rd} * i_{sq},\tag{1.10}$$

где p – число пар полюсов, а коэффициент $3/2$ обеспечивает соответствие мощностей при преобразовании;

4) Уравнение движения (1.11):

$$J * d\Omega_p / dt = M - M_c, \quad (1.11)$$

где J – момент инерции;

Ω_p – механическая скорость ротора;

M_c – момент сопротивления нагрузки.

Момент сопротивления нагрузки для центробежных насосов (пример резкопеременной нагрузки), используемых на котельных, определяется соотношением (1.12):

$$M_c = k * \omega^2. \quad (1.12)$$

Моделирование влияния запуска АД насоса проведено для условий электрической схемы, представленной на рисунке 1.35. Как правило солнечно-дизельные комплексы помимо солнечной и дизельной электростанций включают в свой состав систему накопления электрической энергии (СНЭЭ). В состав потребителей электрической энергии помимо коммунально-бытовой нагрузки могут входить также промышленные предприятия и муниципальные объекты, имеющие в своем составе двигательную нагрузку.

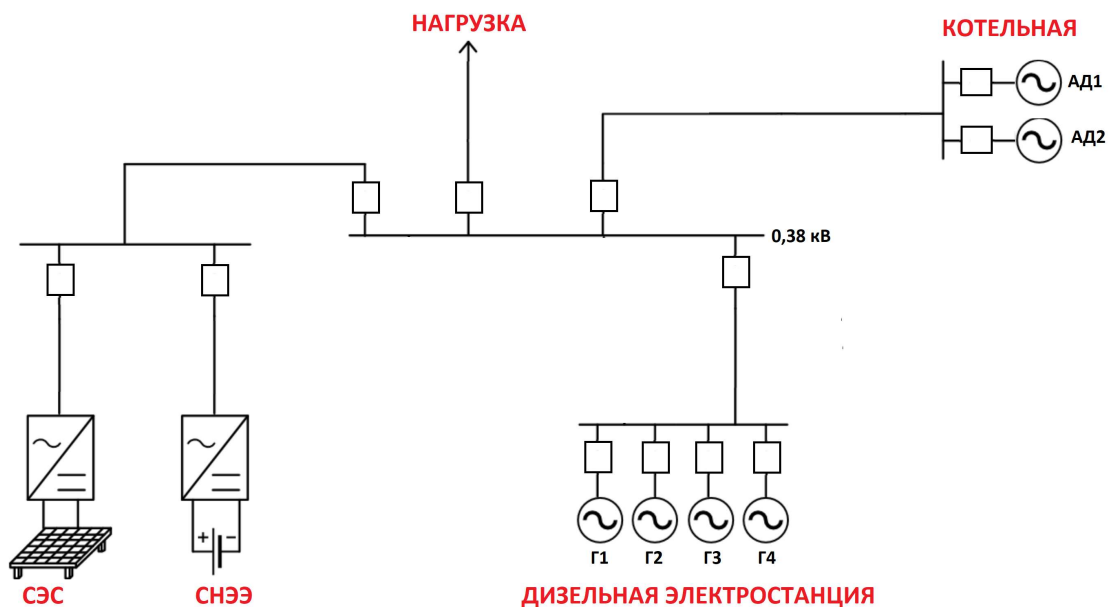


Рисунок 1.35 – Типовая схема СДК

Таким образом, питание резкопеременной нагрузки (запускаемых двигателей) в зависимости от режима работы СДК может обеспечиваться либо от (1) дизель-генераторных установок, либо от (2) инверторов СЭС или СНЭЭ, либо различными комбинациями первого и второго вариантов. При этом каждому источнику энергии, входящему в СДК, присущи свои особенности.

Результаты моделирования запуска насоса мощностью 22 кВт приведены на рисунке 1.36 и в таблице 1.15. Анализ осциллограммы тока показывает, что при пуске АД ток превышает ток в установившемся режиме до 7 раз.

С учетом полученных результатов проведена оценка величины просадки напряжения на питающих шинах и проверка превышения максимально допустимого тока инвертора для двух случаев реальных СДК в населенных пунктах Хонуу и Кулун-Елбют (республика Саха (Якутия)).

Эти два СДК принципиально различаются по мощности: например самые маленькие ДГУ в Кулун-Елбюте имеют мощность 50 кВт, в то время как в Хонуу – почти 600 кВт. Используемые солнечные инверторы отличаются по мощности более чем в три раза.

Таким образом, рассмотрены варианты, в которых мощность запускаемого насоса имеет один порядок с источником энергии (ДГУ или инвертором) или существенно (в разы для инвертора и на порядок для ДГУ) меньше.

Можно сделать следующий вывод: если мощность источника энергии существенно превышает мощность пускаемого АД, то его запуск не оказывает существенного влияния на режим работы сети и наоборот. Однако важно отметить, что в каждом конкретном случае проведение анализа процессов, связанных с работой резкопеременной нагрузки необходимо проводить, чтобы предотвратить возможные отключения генерирующего оборудования и перебои в электроснабжении потребителей.

Возможные пути решения обозначенной проблемы:

- во время отопительного сезона не переводить СДК в «зеленый режим». Непрерывная работа ДЭС обеспечит бесперебойное энергоснабжение потребителей. Однако, это приводит к снижению экономической эффективности проекта СДК;
- рассмотреть возможность использования суперконденсаторов в составе СНЭЭ, которые могут обеспечить прохождение пиковых нагрузок и поддержание показателей качества электроэнергии в сети, а также способствовать «разгрузке» электрохимических накопителей, снижению их деградации и продлению срока службы.

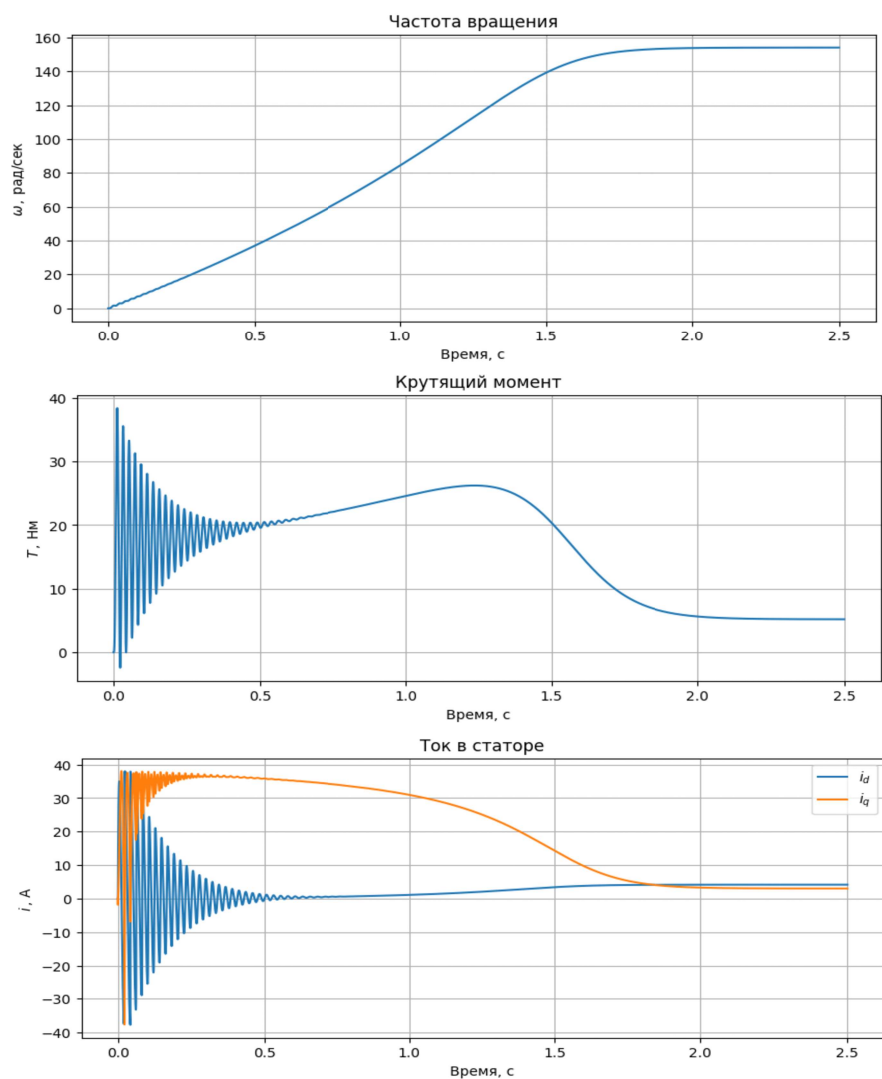


Рисунок 1.36 – Осциллограммы запуска АД

Таблица 1.15 – Влияние пуска АД сетевого насоса

Населенный пункт	Параметры ДГУ	Величина снижения напряжения	Параметры инвертора СЭС	Проверка инвертора
Мому (Хонуу)	$P_{\text{ген}} = 595 \text{ кВт}$ $S_{\text{ген}} = 744 \text{ кВА}$ $X''_d = 0,12 \text{ Ом}$	$\Delta U = 1,6 \%$	$S_{\text{инв}} = 110 \text{ кВА}$ $I_{\text{max}} = 158,8 \text{ А}$ 14 шт.	$S_{\text{пуск}} \leq S_{\text{инв}}$ $I_{\text{пуск}} \leq I_{\text{max}}$
Кулун-Елбют	$P_{\text{ген}} = 50 \text{ кВт}$ $S_{\text{ген}} = 63 \text{ кВА}$ $X''_d = 0,10 \text{ Ом}$	$\Delta U = 15,4 \%$	$S_{\text{инв}} = 36,3 \text{ кВА}$ $I_{\text{max}} = 55,0 \text{ А}$ 3 шт.	$S_{\text{пуск}} \leq S_{\text{инв}}$ $I_{\text{пуск}} > I_{\text{max}}$

1.4.2 Моделирование систем накопления энергии с суперконденсаторами

Рассмотрим основные подходы к моделированию СК:

- 1) Выбор схемы замещения суперконденсатора.

СК типа EDLC (двухслойные электрические конденсаторы), которые на сегодняшний день являются самыми распространенными, характеризуются сложным динамическим поведением, связанным с распределением заряда в пористой структуре углеродных электродов, и эффектами релаксации. Как показано в работах и, одноветвевая RC-модель не способна адекватно описывать как начальный отклик, так и медленные процессы перераспределения заряда, возникающие в СК после снятия тока.

В связи с этим в исследовании выбрана трехветвевая RC-модель Зубиеты-Бонерта (см. рисунок 1.37), состоящая из:

- краткосрочной (немедленной) ветви – имеет наибольшую емкость и самую малую постоянную времени (миллисекунды): она отвечает за мгновенный отклик устройства;
- отложенной (среднесрочной) ветви – отражает процессы переноса заряда, происходящие в течение секунд или минут после быстрого начального заряда (например, диффузия ионов в глубину пористого электрода);
- долгосрочной ветви – характеризует самые медленные процессы, такие как утечка и релаксация заряда в масштабах десятков минут и более [194].

Такое разделение хорошо согласуется как с теоретическим поведением EDLC, так и с результатами экспериментальных работ, в которых отмечается высокая точность такой модели [165,195].

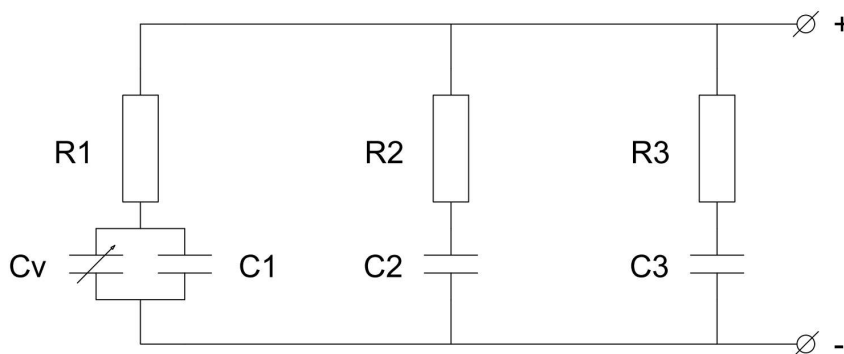


Рисунок 1.37 – Трехветвевая схема замещения СК согласно модели Зубиеты-Бонерта

Одновременно рассматривалась модель MATLAB Simulink, представляемая закрытым блоком «Supercapacitor» и базирующаяся на упрощенной трехветвевой схеме замещения (рисунок 1.38) [196]. Важно отметить, что MATLAB Simulink не предоставляет доступ к внутреннему устройству модели, и невозможно проверить, каким образом реализованы ее эквивалентные ветви, зависимость емкости от напряжения или алгоритмы

расчета внутреннего сопротивления (ESR). Это накладывает ограничения на использование данного блока для научного анализа, хотя он удобен для инженерного моделирования.

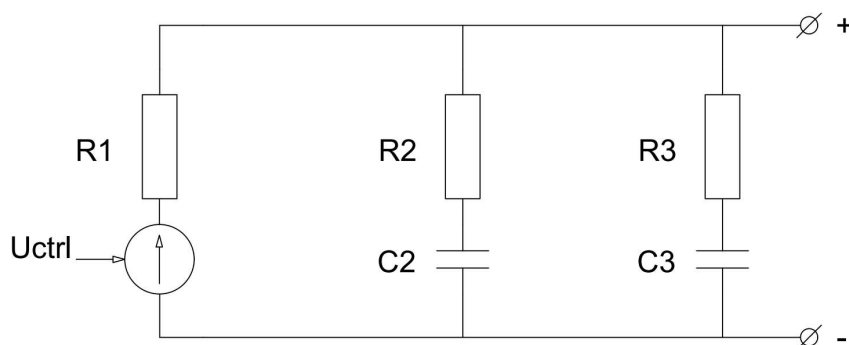


Рисунок 1.38 – Упрощенная схема замещения СК, используемая в MATLAB Simulink

Таким образом, результаты проведенной аналитической работы стали основой для последующих этапов: предварительного расчета параметров упрощенной схемы замещения, экспериментального определения параметров схемы замещения по модели Зубиеты-Бонерта и сопоставления результатов математического моделирования;

2) Предварительный расчет параметров схемы замещения СК.

Для определения параметров трехветвевой схемы замещения по модели Зубиеты-Бонерта необходимо провести реальные испытания с использованием источника постоянного тока и СК, в то время как параметры упрощенной схемы могут быть частично рассчитаны по паспортным данным устройства.

Для вычисления параметров упрощенной схемы использовались технические характеристики СК Феникс МСК-96-58 (см. таблицу 1.16) и типовая пропорция распределения емкостей, применяемая в MATLAB Simulink: 0,677; 0,307; 0,004 и 0,012 (при $U_{СК} = U_n/2$).

Таблица 1.16 – Паспортные данные СК Феникс МСК-96-58

Параметр	Значение
Номинальное напряжение U_n , В	58
емкость C_0 , Ф	96
Внутреннее сопротивление (ESR), мОм	Менее 15
Максимальная запасаемая энергия, Вт · ч	48
Максимальный разрядный ток, А	1000

Далее были выбраны ориентировочные значения временных постоянных на основе анализа поведения упрощенной модели, а именно: $\tau_2 \approx 436,2$ с и $\tau_3 \approx 1356$ с. Соответствующие сопротивления RC-цепей были определены по формуле (1.13):

$$R_i = \frac{\tau_i}{C_i}. \quad (1.13)$$

Параметры, рассчитанные на этой стадии, представлены в таблице 1.17 и в дальнейшем использовались в математической модели № 1, формирующаяся в готовом формате MATLAB Simulink;

Таблица 1.17 – Результаты предварительного расчета параметров упрощенной схемы замещения

Параметр	C_1, Φ	C_v, Φ	C_2, Φ	C_3, Φ	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
Значение	65	29,47	0,38	1,15	0,015	1151,9	1138,4

3) Экспериментальное определение параметров схемы замещения СК.

Для точного определения параметров трехветвевой схемы замещения по модели Зубиеты-Бонерта были проведены испытания суперконденсатора Феникс МСК-96-58 на экспериментальном комплексе кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Описание методологии и результаты эксперимента представлены в пункте 5.2.10 и в протоколе испытания суперконденсатора приложения Д.

Полученные результаты позволили определить фактические пропорции емкостей C_1 , $C_2(U/2)$, C_3 и C_4 (0,48; 0,39; 0,03 и 0,1) и легли в основу математической модели № 2. Более подробные результаты расчета по методологии Зубиеты-Бонерта представлены в таблице 5.7;

4) Сравнение математических моделей СК.

На основе полученных параметров схем замещения СК (модели № 1 и № 2) были собраны простые схемы заряда и разряда и проведено соответствующее математическое моделирование. Заряд постоянным током 4,9902 А (для более точного соответствия реальному эксперименту) осуществлялся из полностью разряженного состояния. Результаты соответствующих экспериментов в графическом виде представлены на рисунке 1.39.

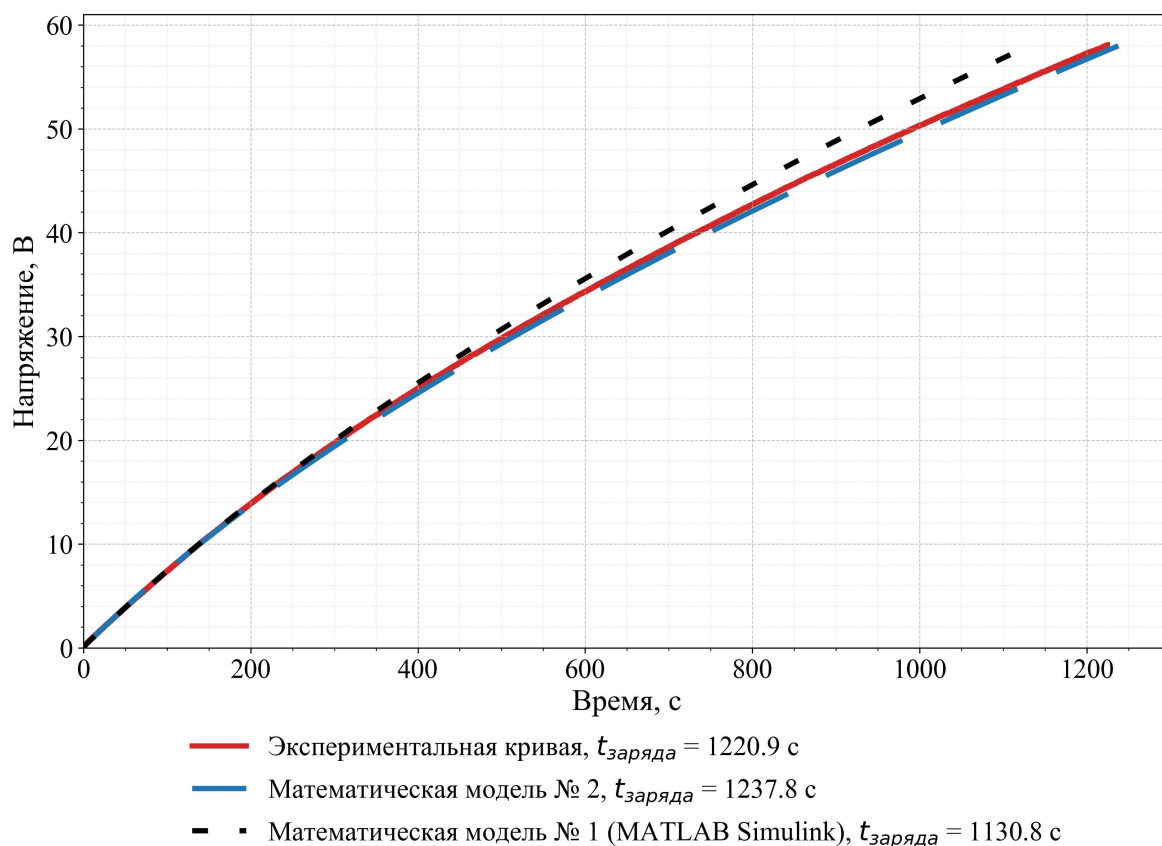


Рисунок 1.39 – Результаты моделирования процесса заряда СК постоянным током 5 А

Использование модельно-ориентированного анализа позволяет сопоставить время заряда виртуальной модели и реального СК. Так, согласно рисунку 1.39, математическая модель № 2 достигает номинального напряжения за 1237,8 сек, тогда как в эксперименте это время составило 1220,9 сек. Это может быть связано с тем, что в проведении эксперимента не учитываются сопротивления проводов и производится некоторое упрощение исследуемого объекта, которое необходимо для быстрого и точного моделирования. Однако относительная погрешность в 1,3 % подтверждает корректность расчета параметров схемы замещения.

В свою очередь модель № 2 (MATLAB Simulink) показывает время достижения номинального напряжения в 1130,8 с, что соответствует отклонению от экспериментальных данных на 7,4 %, что формально свидетельствует о нормальной точности приближения. Однако использование модели MATLAB Simulink в качестве основной не рекомендуется, поскольку ее внутренняя структура является закрытой: отсутствует доступ к алгоритмам распределения емкостей, моделированию релаксационных процессов и зависимостей параметров от напряжения. Это не позволяет

контролировать физическую корректность модели, проводить параметрическую идентификацию или адаптировать ее к СК с другими характеристиками.

Тем не менее, модель MATLAB Simulink остается удобной для ориентировочного инженерного моделирования и сравнения динамических характеристик без проведения эксперимента, тогда как расчетная модель с экспериментально определенными параметрами должна рассматриваться как базовая для дальнейшего анализа и исследования различных топологий подключения СК;

5) Моделирование параллельной работы аккумуляторных батарей и суперконденсаторов при пассивной схеме соединения.

Для оценки влияния СК на работу гибридной СНЭЭ рассмотрим пассивную топологию совместного подключения АКБ и СК. Такая конфигурация обеспечивает наиболее «чистое» представление о взаимодействии накопителей, поскольку между ними отсутствуют элементы силовой электроники (например, DC/DC-преобразователи), которые изменяют напряжение, токи и динамические характеристики устройств. В пассивной топологии распределение токов определяется исключительно внутренними параметрами АКБ и СК, что позволяет непосредственно оценить вклад СК в сглаживание переходных процессов и разгрузку батареи.

Для анализа работы такой схемы было решено рассмотреть следующие характерные сценарии функционирования гибридной СНЭЭ:

- заряд с постоянной мощностью,
- разряд при запуске двигателя,
- разряд при разном количестве СК,
- работа при коротком замыкании (КЗ).

Особенности реализации каждого из этих сценариев:

а) Заряд с постоянной мощностью.

Рассмотрим параллельное соединение АКБ, заряженной на 50 % (параметры приведены в таблице 1.18), по схеме 3p4s (3 параллельных ветви с 4-я последовательно соединенными АКБ в каждой) и одного модуля СК.

В пассивной схеме соединения напряжения АКБ и СК должны совпадать, однако различие сопротивлений соединительных проводов (принимается, что ПуГВ 1×50 длиной 5 м у АКБ – 19,5 мОм; ПуГВ 1×25 длиной 2 м у СК – 8,8 мОм) приводит к небольшим расхождениям распределения токов. Заряд гибридной системы осуществляется мощностью 5 кВт. В модели первые 100 секунд происходит выравнивание напряжений,

после чего воспроизводится резкий наброс мощности для оценки способности схемы ограничивать импульсные токи. Результаты представлены на рисунке 1.40.

Таблица 1.18 – Паспортные данные АКБ Yellow GB 12-200

Параметр	Значение
Тип накопителя	Свинцово-кислотный
Номинальное напряжение, В	12
емкость, А ч	200
Максимальное напряжение, В	12,8
Внутреннее сопротивление, мОм	3,3

Моделирование показывает, что при внезапном появлении тока зарядки аккумулятор без СК мгновенно принимает на себя весь импульс. В схеме с СК амплитуда скачка тока значительно ниже – более чем на 55 %. Это объясняется меньшим внутренним сопротивлением и меньшими потерями в проводах на пути к СК, что позволяет ему быстрее реагировать на изменение режима и разгружать АКБ;

б) Разряд при запуске двигателя.

Схема соединения АКБ и СК сохраняется такой же, как и в предыдущем моделировании (пункт а)). В исходном состоянии накопители не нагружены, после чего к ним подключается эквивалент стартового тока трехфазного двигателя с номинальным фазным током 115,2 А и кратностью пускового тока 6. С учетом преобразования в звено постоянного тока результирующий ток нагрузки составляет 155,52 А. Первые 140 секунд моделирования отводятся на выравнивание напряжений между АКБ и СК, после чего формируется импульс, соответствующий запуску двигателя. Динамика токов приведена на рисунке 1.41.

Полученные результаты показывают, что параллельное подключение СК уменьшает пиковую нагрузку на аккумулятор более чем на 55 %. После кратковременного отбора энергии СК начинает быстро восстанавливаться, и часть нагрузки вновь переходит к АКБ.

Для оценки поведения системы при различных уровнях нагрузки было проведено дополнительное моделирование с токами, увеличенными вдвое и уменьшенными в десять раз. Хотя абсолютные значения токов и напряжений изменяются пропорционально, относительный вклад СК в ограничение пиковых токов остается практически неизменным. При этом необходимо учитывать паспортные ограничения: максимальный допустимый ток модуля Феникс МСК-96-58 составляет 1000 А. В пусковых режимах с фазным током двигателя выше ~310 А СК достигает токового предела, что ограничивает возможность полной компенсации импульсной нагрузки такой СНЭЭ;

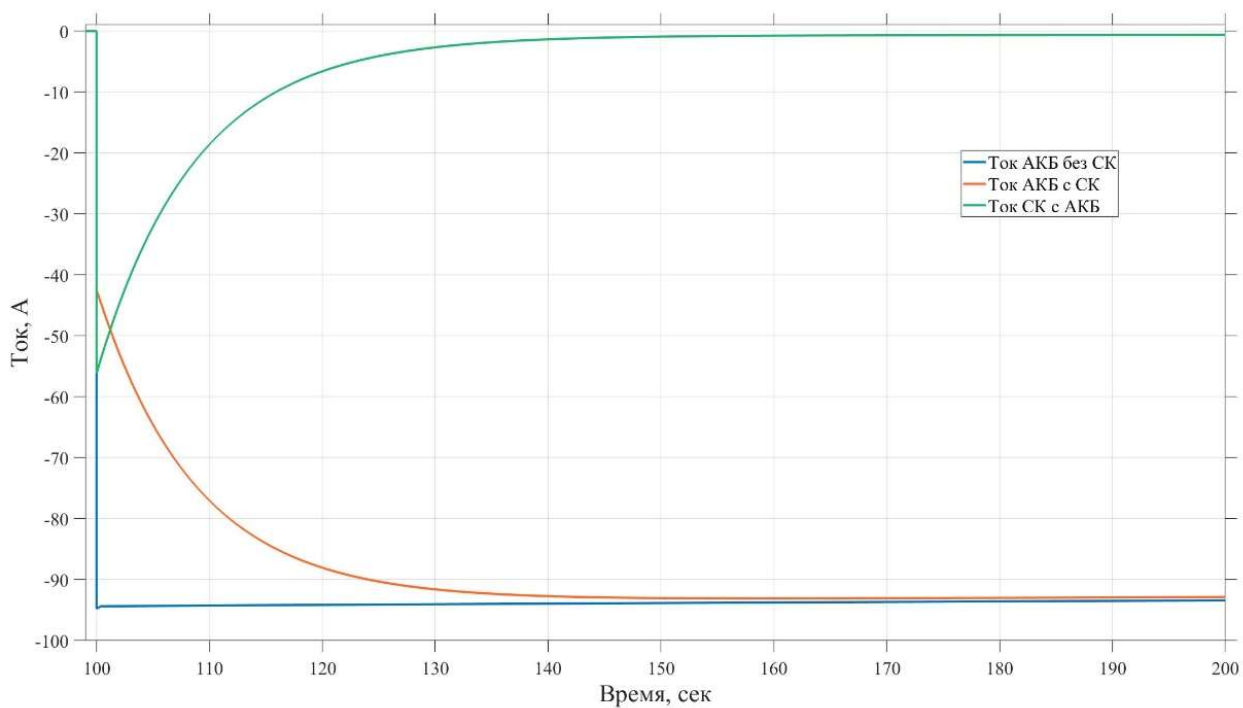


Рисунок 1.40 – Токи АКБ и СК при заряде с постоянной мощностью 5 кВт

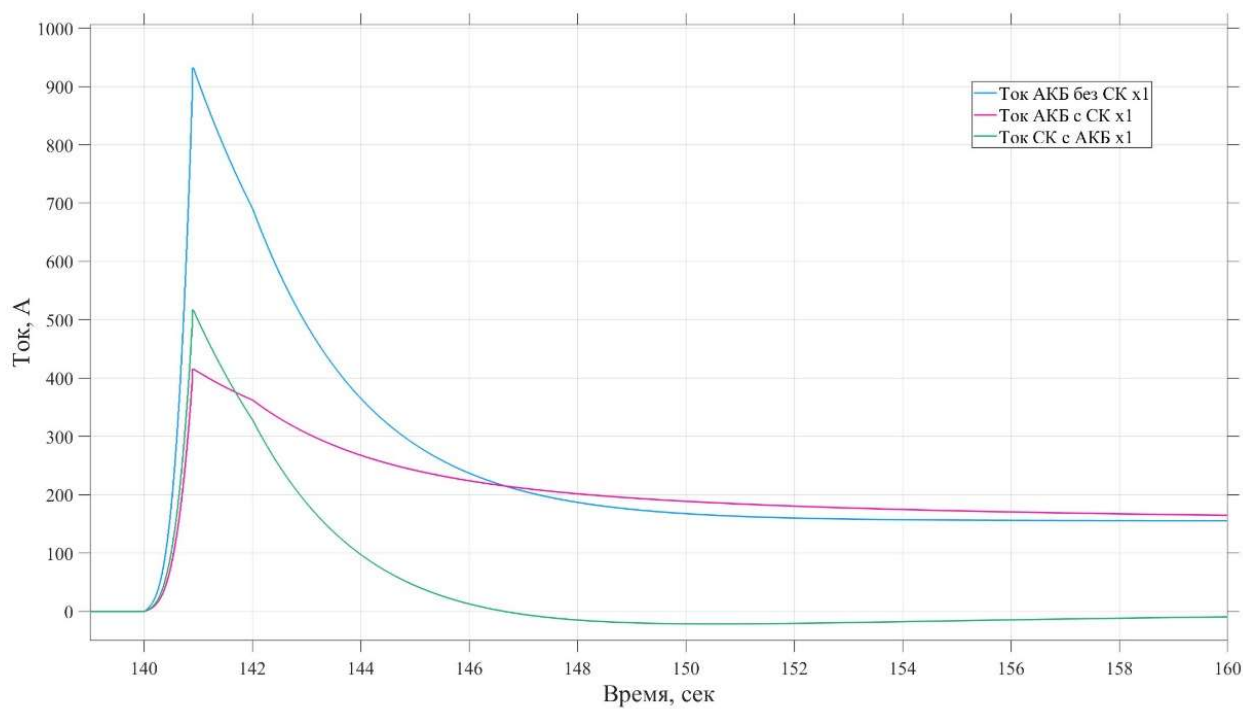


Рисунок 1.41 – Токи АКБ и СК при двигательной нагрузке

в) Разряд при разном количестве СК.

При оценке эффективности работы СК важно, чтобы гибридная СНЭЭ сохраняла близкие к номинальным значениям параметры даже при резких переходных процессах.

Как показано в предыдущих пунктах, подключение СК снижает нагрузку на АКБ, однако степень разгрузки можно дополнительно увеличить, уменьшив эквивалентное сопротивление СК путем их параллельного соединения.

Рассмотрим схему из пункта б) с пусковым током двигателя 115,2 А и изменим число параллельно подключенных модулей СК. При проведении моделирования анализировались варианты с 1, 2, 5, 9 и 18 модулями Феникс МСК-96-58. Результаты представлены на рисунке 1.42.

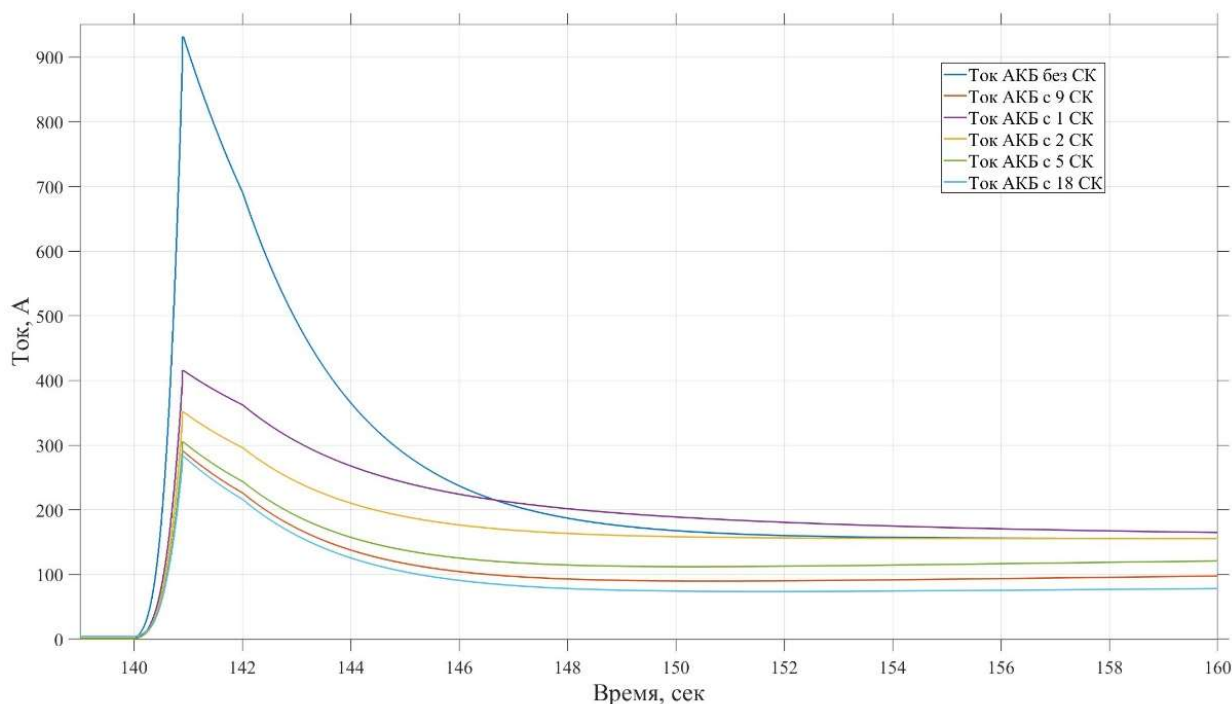


Рисунок 1.42 – Токи АКБ при пуске двигателя с разным количеством СК

Рост числа СК приводит к увеличению доли тока, которую принимает на себя СК, вплоть до 70 %, однако прирост этого эффекта постепенно уменьшается вследствие гиперболического характера снижения эквивалентного сопротивления параллельной группы. Уже при использовании более двух модулей в рассматриваемом примере аккумулятору практически не требуется компенсировать последующий дозаряд СК после пуска двигателя. При увеличении числа модулей до 9 ток АКБ снижается более чем на 100 А.

Таким образом, дальнейший выбор количества СК определяется режимами работы СНЭЭ: чем выше амплитуда и частота импульсных нагрузок, тем большее число параллельно соединенных СК требуется для обеспечения надежной работы системы;

г) Работа при коротком замыкании.

Используем схему из предыдущего примера, но заменим нагрузку моделируемым коротким замыканием с сопротивлением 0,01 Ом длительностью 20 секунд. Реакция пассивной топологии представлена на рисунке 1.43.

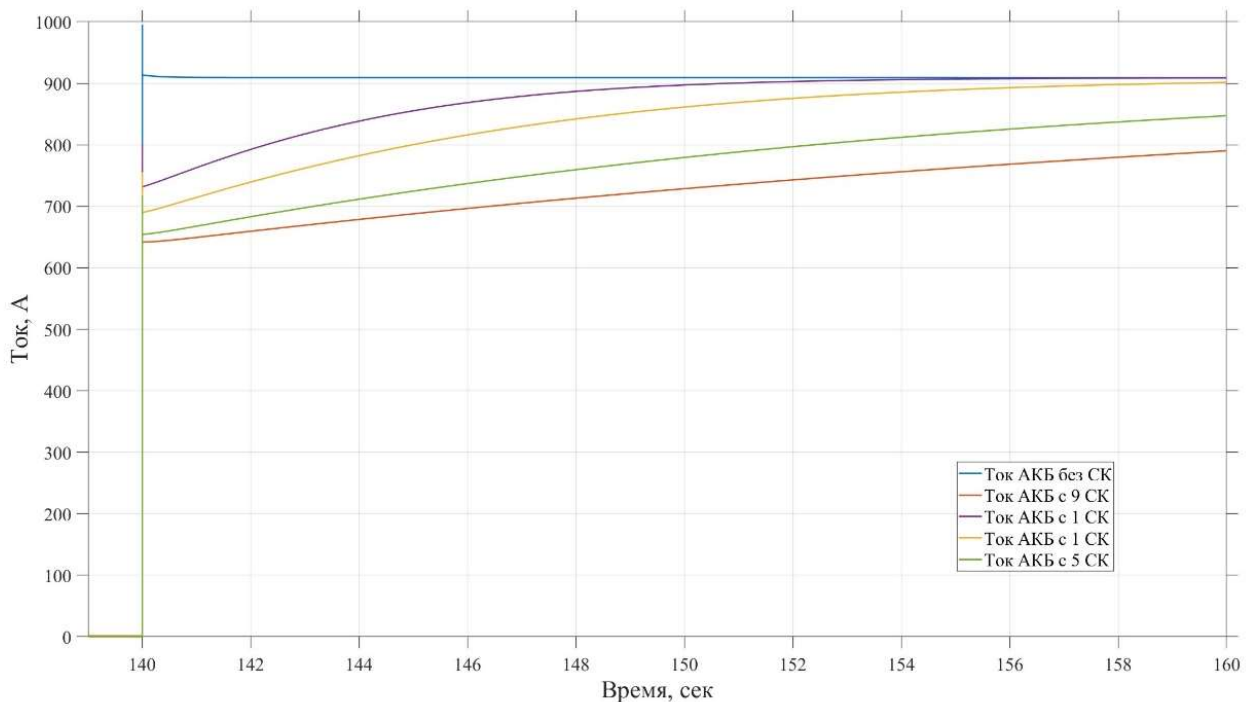


Рисунок 1.43 – Токи АКБ при КЗ с разным количеством СК

Результаты моделирования показывают, что при возникновении КЗ в звене постоянного тока СК снижает пиковый ток, протекающий через аккумуляторную батарею, приблизительно на 35 % по сравнению с ситуацией, когда в цепи используется только АКБ. Однако по мере удержания КЗ ток АКБ постепенно возрастает, поскольку энергия СК быстро исчерпывается. Анализ различных вариантов числа параллельно подключенных СК показывает, что увеличение их количества позволяет дольше удерживать сниженный уровень тока КЗ, что повышает устойчивость системы в аварийных режимах.

Таким образом, полученные результаты математического моделирования демонстрируют ограничения пассивной схемы соединения АКБ и СК при работе в аварийных режимах и подчеркивают необходимость управляемого перераспределения мощности между накопителями. Это служит основанием для перехода к рассмотрению полуактивных и активных схем подключения, где применение DC/DC-преобразователей

позволяет повысить эффективность работы гибридной СНЭЭ и расширить ее функциональные возможности.

Основные выводы по пункту 1.4.2.

В работе проведен анализ влияния СК на динамическое поведение гибридной СНЭЭ в распределенных энергетических комплексах с ВИЭ. Моделирование показало, что применение СК позволяет снизить амплитуду импульсных токов АКБ на 55-70 % и уменьшить переходные просадки напряжения, что существенно повышает устойчивость системы при кратковременных нагрузочных воздействиях.

Построена математическая модель СК на основе трехветвевой схемы Зубиеты-Бонерта и выполнено сравнение двух вариантов моделей: экспериментально идентифицированной модели и встроенной модели MATLAB Simulink. Наиболее высокую точность воспроизведения экспериментальных характеристик показала расчетная модель (погрешность порядка 1,3 %). Она обеспечивает полную прозрачность параметров и корректное описание релаксационных процессов, что делает ее предпочтительной для научного моделирования и дальнейшего анализа гибридных топологий, но без проведения эксперимента ее реализация становится невозможным. Менее точной оказалась модель MATLAB Simulink (около 7,4 %). ее применение ограничено закрытой структурой и невозможностью анализа внутренних параметров, что делает ее неприемлемой для задач исследовательского характера, однако в некотором приближении она может использоваться для предварительной оценки функционирования СК.

Моделирование параллельной работы АКБ и СК в пассивной топологии подтвердило способность СК эффективно разгружать аккумулятор и стабилизировать напряжение шины постоянного тока. Установлено, что увеличение числа параллельно подключенных модулей СК снижает пиковые токи и улучшает динамику системы, однако эффект имеет характер убывающей отдачи из-за гиперболического уменьшения эквивалентного сопротивления.

Проведенное исследование демонстрирует ограниченность пассивной топологии в аварийных режимах и подчеркивает необходимость применения управляемых полуактивных и активных схем соединения АКБ и СК. Полученные результаты создают основу для выбора параметров DC/DC-преобразователей и разработки систем управления гибридными накопителями энергии на следующем этапе работы.

2 Техническое задание на изготовление экспериментального образца гибридной системы накопления энергии с учетом возможности проведения испытаний в условиях резкопеременных нагрузок

2.1 Общие положения

В соответствии с техническим заданием на НИОКР в рамках первого этапа предусмотрено создание экспериментального образца гибридной СНЭЭ (по определению ГОСТ Р 15.101 [197] – «законченного в функциональном отношении изделия, пригодного для исследовательских испытаний, выполненного в натуральную величину и предназначенного для проверки и обоснования основных технических решений, параметров и характеристик продукции»). Проведение исследовательских испытаний экспериментального образца гибридной СНЭЭ в соответствии с ГОСТ 16504 [198] выполняется в первую очередь с целью:

- «оценки показателей качества функционирования испытуемого объекта в определенных условиях его применения,
- построения математической модели функционирования объекта».

На втором этапе НИОКР («Разработка системы управления АГЭК с гибридной СНЭЭ», 2026 год) предусмотрена разработка математической модели гибридной СНЭЭ, включающей возможность выбора конфигурации СНЭЭ. В соответствии с ГОСТ Р 57412 [199] математическая модель должна являться «численной процессной» моделью, т.е. имеющей возможность моделировать процессы (режим работы) гибридной СНЭЭ в различных внешних условиях путем решения методами вычислительной математики системы уравнений, описывающей свойства гибридной СНЭЭ. Проведение процедуры подтверждения адекватности математической модели (валидации) должно быть проведено путем проведения натурных экспериментов на экспериментальном образце гибридной СНЭЭ.

Таким образом, подготовленное техническое задание на изготовление экспериментального образца гибридной СНЭЭ соответствует задаче получения полноразмерного макета, позволяющего провести получение необходимых параметров и характеристик режимов работы гибридных СНЭЭ, достаточных для осуществления валидации математической модели гибридной СНЭЭ.

ГОСТ Р 58092.2.1 [200] и ГОСТ Р 58092.2.2 [201] предусматривают использование СНЭЭ нескольких классов приложения. Разрабатываемый макет гибридной СНЭЭ должен соответствовать следующим классам и выполнять соответствующие функции:

– класс «А» (СНЭЭ обеспечивает поглощение или отдачу требуемой мощности в течение непродолжительного рабочего цикла, как правило – не более чем за 1 ч), функция снижения колебаний потоков мощности солнечных и ветровых электростанций и функция снижения провалов напряжения;

– класс «В» (СНЭЭ обеспечивает поглощение или отдачу требуемой мощности в течение длительного рабочего цикла, как правило – более чем за 1 ч), функция поддержки возобновляемых источников энергии.

2.2 Техническое задание на изготовление экспериментального образца гибридной системы накопления энергии

2.2.1 Общие сведения

Наименование образца: Гибридная система накопления электрической энергии (далее – Макет гибридной СНЭЭ).

Основание для разработки: г/б НИОКТР № 1002250 (государственное задание № FSWF-2025-0003).

Заказчик: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Исполнитель: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университете «МЭИ», лаборатория «Системы управления солнечно-дизельными комплексами» кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии.

Сроки выполнения:

- начало: 08.04.2025,
- завершение: 31.12.2025.

2.2.2 Цель и назначение

Цель создания образца: демонстрация работоспособности гибридной СНЭЭ при работе на резкопеременную нагрузку; получение исходной информации для валидации математической модели гибридной СНЭЭ.

Назначение: экспериментальный образец гибридной СНЭЭ предназначен для исследований, испытаний и отработки режимов работы гибридной СНЭЭ, включающей аккумуляторные батареи (АКБ) и суперконденсаторные модули (СКМ) в составе единой системы; макет гибридной СНЭЭ должен обеспечивать перераспределение во времени энергии, поступающей от внешнего источника в график, соответствующий работе резкопеременной нагрузки.

2.2.3 Технические требования

Технические требования к экспериментальному образцу гибридной СНЭ:

- 1) Основные параметры.

Макет гибридной СНЭЭ включает в свой состав электрохимические накопители и суперконденсаторы. Технические характеристики используемых накопителей энергии представлены в таблицах 2.1 и 2.2 [202] [203].

Таблица 2.1 – Технические характеристики суперконденсаторного модуля МСК-96-58

№ п/п	Параметр	Значение
1	Номинальная емкость	96 Ф
2	Номинальное напряжение	58 В
3	Габаритные размеры	251x251x215 мм
4	Вес	10,5 кг
5	Максимальное напряжение	60 В
6	Максимальное импульсное напряжение	64 В
7	Внутреннее сопротивление	< 15 мОм
8	Максимальный разрядный ток	1000 А
9	Ток утечки	< 40 мА
10	Максимальная запасаемая энергия	48 Вт · ч
11	Удельная энергия	4,57 Вт · ч/кг
12	Диапазон рабочих температур	-45 ~ +65 °С (85 °С при заниженном U_{max})
13	Диапазон температур хранения	-45 ~ +70 °С
14	Срок службы	10 лет при максимальном напряжении и температуре +25 °С: – изменение емкости в пределах 20 % от первоначально заданного значения, – изменение внутреннего сопротивления в пределах 100 % от первоначально заданного значения
15	Циклируемость	После 500 000 циклов разряда заряда при температуре +25 °С: – изменение емкости в пределах 20 % от первоначально заданного значения, – изменение внутреннего сопротивления в пределах 100 % от первоначально заданного значения

Таблица 2.2 – Технические характеристики аккумулятора YELLOW GB 12-200

№ п/п	Параметр	Значение	
1	Номинальная емкость (25°C)	10 часовой разряд (10,8 В) – 200 А·ч, 5 часовой разряд (10,5 В) – 166 А·ч, 1 часовой разряд (9,6 В) – 120 А·ч	
2	Номинальное напряжение	12 В	
3	Число элементов	6 шт.	
4	Тип исполнения	GEL	
5	Габаритные размеры	522x238x238 мм	
6	Вес	59,5 кг	
7	Внутреннее сопротивление полностью заряженной батареи (25 °C)	3,3 мОм	
8	Саморазряд	3 % емкости в месяц при 20 °C	
9	Максимальный разрядный ток (25 °C)	1500 А (5·C)	
10	Рабочий диапазон температур	Разряд Заряд Хранение	-15 ~ +50 °C -10 ~ +50 °C -20 ~ +50 °C

Аккумуляторная батарея состоит из трех параллельно соединенных цепочек аккумуляторов по 4 штуки в каждой.

Батарея суперконденсаторов должна состоять как минимум из трех параллельно соединенных цепочек суперконденсаторных модулей как минимум по 3 штуки в каждой;

2) Требования к конструкции.

Макет гибридной СНЭЭ предназначен для монтажа в составе уже имеющегося в распоряжении ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» макета солнечно-дизельного комплекса контейнерного исполнения, таким образом, испытания будут проведены в нормальных климатических условиях испытаний, установленных ГОСТ 15150.

Электрохимические аккумуляторы должны быть объединены в батарею, параллельно с ней подключены суперконденсаторы.

Цепочки аккумуляторов и суперконденсаторных модулей должны быть соединены друг с другом через коммутационные аппараты, обеспечивающие возможность изменения схемы соединения с целью обеспечения различных выходных характеристик (емкости) макета гибридной СНЭЭ при проведении испытаний возможности испытаний гибридной СНЭЭ разной емкости.

Должна быть предусмотрена возможность проведения измерения величин электрического напряжения и тока во всех узлах электрической схемы;

3) Ограничения.

Предусмотрено использование электрохимических накопителей, выполненных по технологии GEL или LiFePO_4 ; суперконденсаторы – электрические двухслойные конденсаторы (EDLC).

2.2.4 Этапы разработки

В таблице 2.3 приведена этапность работ по изготовлению экспериментального образца гибридной системы накопления энергии с учетом возможности проведения испытаний в условиях резкопеременных нагрузок.

Таблица 2.3 – Этапы разработки

№ п/п	Этап	Срок	Результат
1	Разработка конструкторской документации	25.08.2025	Пояснительная записка, включающая принципиальные электрические схемы и однолинейные схемы
2	Изготовление компонентов	30.09.2025	Смонтированный макет гибридной СНЭЭ, снабженной системой измерений электрических величин
3	Сборка и настройка	10.11.2025	Готовый образец
4	Предварительные испытания	15.12.2025	Отчет об испытаниях

Описание экспериментального образца гибридной системы накопления энергии представлены в разделах 3 и 4.

2.2.5 Методы испытаний

В работе предполагается проведение следующих 2-х видов испытаний:

1) Электрические испытания. Проверка характеристик заряда и разряда гибридной СНЭЭ.

Электрические испытания, включающие процессы заряда и разряда гибридной СНЭЭ при разных постоянных значениях токах ($0,2 * I_{\text{ном}}$; $0,4 * I_{\text{ном}}$; $0,6 * I_{\text{ном}}$; $0,8 * I_{\text{ном}}$; $1,0 * I_{\text{ном}}$). В результате должны быть определены:

- емкость (А·ч) и энергоемкость (Вт·ч) каждого компонента (аккумуляторы, суперконденсаторы),
- КПД системы (отношение отданной энергии к полученной);

2) Испытания для проверки работоспособности гибридной СНЭЭ в различных режимах работы:

- Стационарный режим: разряд от SOC_{max} до SOC_{min} и обратный заряд номинальным током;
- Динамические нагрузки: разряд от SOC_{max} до SOC_{min} и обратный заряд изменяющимся случайным образом током в диапазоне от 0 до $I_{ном}$;
- Работа при пиковых нагрузках (кратковременные токи до 200-300 % от номинала и более), что обеспечит имитацию реальных условий, в том числе режимов, включающих процессы заряда/разряда гибридной СНЭЭ при работе на резкопеременную нагрузку, имитирующей пуск асинхронных двигателей.

Подробная методика проведения испытаний приведена в подразделе 5.1.

При проведении всех испытаний должно быть обеспечено получение временных диаграмм следующих параметров:

- электрический ток батареи суперконденсаторов,
- электрическое напряжение батареи суперконденсаторов,
- электрический ток батареи электрохимических аккумуляторов,
- электрическое напряжение батареи электрохимических аккумуляторов,
- электрический ток со стороны постоянного тока батарейного инвертора,
- электрическое напряжение со стороны постоянного тока батарейного инвертора,
- электрический ток со стороны переменного тока батарейного инвертора,
- электрическое напряжение со стороны переменного тока батарейного инвертора.

Измерение электрических параметров должно производиться в точках, предусмотренных принципиальной схемой, представленной в приложении В.

Для проведения исследовательских испытаний предусмотрено использование измерителей постоянного и переменного тока необходимого номинала и с допустимой погрешностью, технические характеристики которых представлены в таблице 2.4.

2.2.6 Требования к документации

Документация должна включать в себя следующие элементы:

- Эскизная конструкторская документация (в соответствии с ГОСТ 2.125-2008 и ГОСТ 2.702-2011).
- Программа и методика испытаний (ПМИ) в соответствии с ГОСТ Р 2.106-2019.
- Отчет об испытаниях, включающий протоколы испытаний в соответствии с ГОСТ Р 58973-2020.

2.2.7 Порядок приемки

Образец считается принятым после успешных испытаний по пункту 2.2.5 и подписания акта сдачи-приемки.

По завершению работы должны быть подготовлен отчет об испытаниях, включающий протоколы испытаний.

Таблица 2.4 – Технические характеристики рекомендованных к использованию измерителей

№ п/п	Точка измерения на принципиальной схеме, назначение	Тип датчика	Предел измеряемой величины	Погрешность
1	Точка 1, измерение тока на шинах батареи суперконденсаторов и аккумуляторов, 4 шт.	Преобразователь измерительный постоянного и переменного тока по типу ПИТ-500-УА-Б30	0...500 А	±0,5 %
2	Точка 2, измерение тока на шинах батареи суперконденсаторов и аккумуляторов, 4 шт.	Преобразователь измерительный постоянного и переменного тока ПИТ-20-У-4/20-Б14	0...20 А	±1,3 %
3	Точка 3, измерение напряжения на шинах батареи суперконденсаторов и аккумуляторов, 4 шт.	Преобразователь напряжения измерительный ПИН-50-У-4/20-П	0...50 В	±1,5 %
4	Точка 4, измерение напряжения на выходных шинах инвертора, 3 шт.	Преобразователь напряжения измерительный ПИН-300-У-4/20-П	0...300 В	±1,5 %

3 Эскизная документация на экспериментальный образец гибридной СНЭ

3.1 Общие положения

Существующий макет солнечно-дизельного комплекса предназначен для испытаний, моделирования и оптимизации режимов работы автономных и слабосвязанных энергосистем. Он позволяет исследовать взаимодействие между дизельными генераторами, солнечной генерацией и системой накопления энергии при изменяющейся нагрузке и нестабильной выработке ВИЭ. На базе макета можно отрабатывать алгоритмы распределения мощности, поддержания частоты и напряжения, автоматического ввода дизель-генераторов, утилизации избыточной солнечной энергии и приоритетной подачи питания потребителям.

Кроме того, комплекс служит платформой для проверки и настройки систем автоматического управления (АСУ СДК). Он позволяет анализировать эффективность различных стратегий управления накопителями (аккумуляторами и суперконденсаторами), тестировать работу инверторов в сетевом и автономном режимах, исследовать поведение системы при аварийных и переходных процессах. Также макет дает возможность воспроизводить реальные профили нагрузки, погодные условия, проводить исследования по снижению расхода дизельного топлива, повышению доли ВИЭ и устойчивости микроэнергосистем.

3.2 Описание существующего макета СДК

Имитационная модель (макет) солнечно-дизельного комплекса размещена в типовом 40-футовом контейнере, разделенном на два отсека (см. рисунок 3.1). Макет установлен во внутреннем дворе НИУ «МЭИ» и подключен к распределительному устройству внутренней сети вуза, что обеспечивает возможность обеспечения собственных нужд комплекса.

Основными источниками энергии в макете являются дизельные генераторные установки и солнечная электростанция, подключенная через трехфазный сетевой инвертор SMA Sunny Tripower (рисунок 3.2).

Имитация работы солнечной электростанции выполняется с помощью двух программируемых источников питания постоянного тока Delta Elektronika BV SM 660-AR-11.

Для повышения эффективности работы СЭС и стабилизации автономной сети предусмотрена система накопления электроэнергии (СНЭЭ). Она предназначена для компенсации изменений мощности и максимизации выработки энергии ВИЭ. СНЭЭ построена на батарейных инверторах Victron Energy Quattro и необслуживаемых

свинцово-кислотных аккумуляторах Yellow GB 12-200, объединенных в батарею напряжением 48 В (рисунок 3.3).



Рисунок 3.1 – Контейнер, где расположен макет СДК

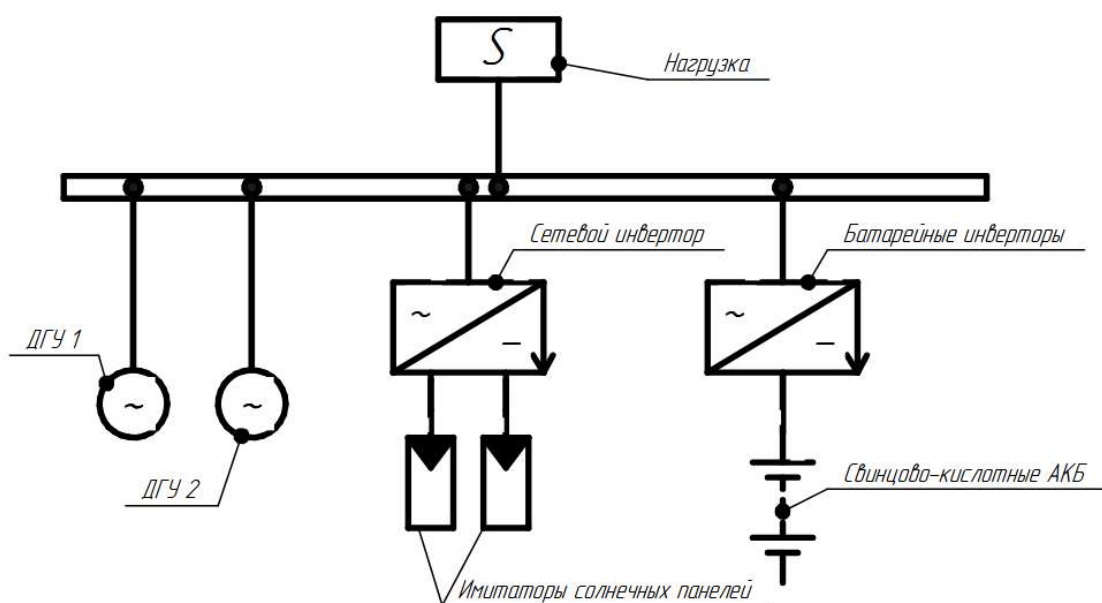


Рисунок 3.2 – Упрощенная электрическая схема комплекса

При отсутствии солнечной генерации электроснабжение потребителей осуществляется от дизельных генераторных установок, способных покрывать полный диапазон нагрузок, характерных для работы комплекса в суточном и сезонном цикле. В предыдущих исследованиях молодежной лаборатории были получены и экспериментально

подтверждены энергетические характеристики ДГУ – удельный расход топлива, КПД, статическая и динамическая нагрузочная способность – что позволило выбрать оптимальные режимы их работы и реализовать управление по критерию минимизации расхода дизельного топлива.

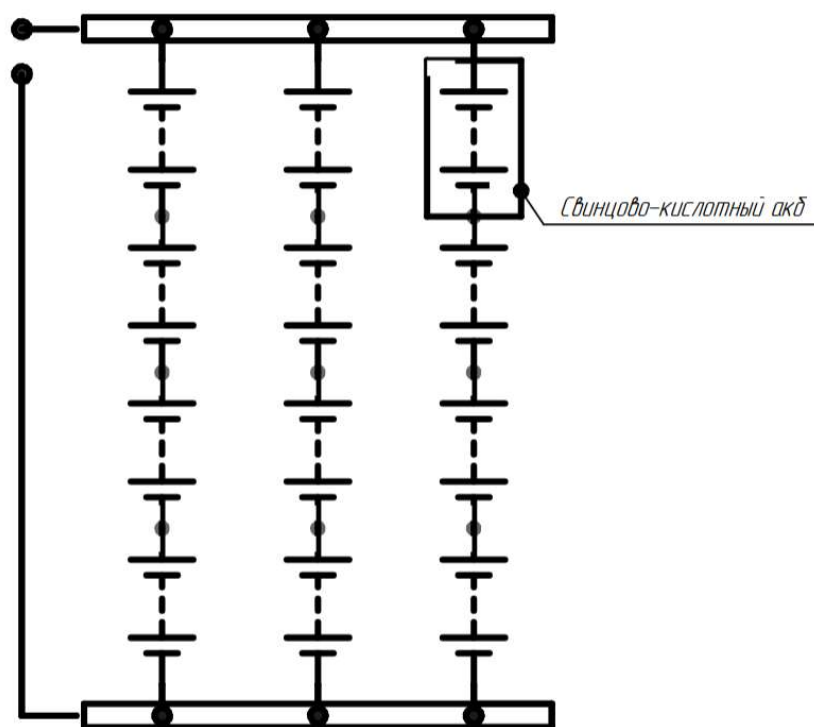


Рисунок 3.3 – Электрическая схема соединения свинцово-кислотных АКБ

Особенностью макета является наличие системы имитации нагрузки, позволяющей воспроизводить реальные профили потребления электроэнергии. График нагрузки формируется с использованием активных и индуктивных потребителей, подключаемых ступенчато или программно, что обеспечивает моделирование резких пусковых нагрузок, вечерних пиков, ночных провалов потребления и аварийных ситуаций. Данная система использовалась для испытаний режимов работы дизель-генераторов, накопителя энергии и алгоритмов управления (АСУ СДК), разработанных на этапах НИОКР.

Практическое применение макета позволило подтвердить следующие возможности: работа одного и двух дизель-генераторов параллельно, автоматическое поддержание частоты и напряжения, переход между режимами «одиночный ДГУ – совместно с СНЭ – совместно с СЭС», автоматическое включение/отключение ДГУ по команде системы управления и компенсация кратковременных скачков нагрузки за счет системы накопления. Таким образом, макет не только обеспечивает автономное питание нагрузки,

но и служит полнофункциональной платформой для проверки алгоритмов прогнозирования, оптимизации и распределения мощности между источниками.

3.2.1 Состав и краткое описание оборудование макета

В состав макета входят две дизельные генераторные установки, обеспечивающие питание потребителей и моделируемой системы электростанции. Генераторы оснащены системами автоматической синхронизации, АВР, АРЧ и АРС, что позволяет им работать как совместно друг с другом, так и независимо.

Один из генераторов выполняет функцию ведущего по частоте, задавая опорное напряжение для инверторов и обеспечивая баланс активной и реактивной мощности. Схема включения предусматривает возможность питания нагрузки при отключенной системе накопления или имитаторах СЭС.

СНЭЭ реализована на базе трех однофазных инверторов Victron Energy Quattro, объединенных в трехфазную электротехническую схему, и свинцово-кислотных аккумуляторных батарей Yellow GB 12-200, соединенных в аккумуляторную батарею (48 В DC).

Инверторы обеспечивают преобразование постоянного тока в переменный (220 В, 50 Гц), контроль процессов заряда-разряда, автоматический запуск дизель-генератора при необходимости, а также управление приоритетами нагрузок и утилизацию избыточной солнечной мощности.

Аккумуляторная батарея состоит из 12 батарей, объединенных в последовательно-параллельную схему, и выполняет функции хранения и кратковременной компенсации колебаний мощности.

Имитация СЭС осуществляется с помощью двух управляемых источников постоянного тока Delta Elektronika BV SM 660-AR-11, дополненных модулями INT MOD SIM, и сетевого инвертора SMA Sunny Tripower.

Источники питания моделируют характеристики солнечных панелей с максимальной выходной мощностью до 3 кВт и позволяют задавать различные сценарии освещенности. Инвертор выполняет преобразование постоянного тока в переменный и подключается к сети при наличии опорного напряжения. Самостоятельная работа инвертора без сети невозможна, что исключает питание нагрузки только от имитатора СЭС.

Автоматическая система управления (АСУ) СДК выполняет функции шлюза для сбора и обработки данных, обеспечивая взаимодействие с основными подсистемами –

контроллерами дизель-генераторов, контроллерами системы накопления, контроллерами имитаторов СЭС и счетчиками электроэнергии.

Система управления макетом СДК обеспечивает двунаправленный обмен данными с основным оборудованием: дизель-генераторами, инверторами системы накопления, сетевым инвертором СЭС, счетчиками электроэнергии и устройствами нагрузки. Обмен включает телеметрию (измеряемые параметры: напряжение, ток, частота, мощность, SOC аккумуляторов, состояние ДГУ), телесигнализацию (состояния, аварии, предупреждения) и телеуправление (пуск/останов ДГУ, изменение уставок, подключение нагрузок).

На базовом уровне управление осуществляется встроенными контроллерами инверторов Victron Energy Quattro, которые обеспечивают:

- поддержание частоты и напряжения сети в островном режиме,
- автоматическое включение/отключение ДГУ при разряде аккумуляторов или превышении нагрузки,
- синхронизацию с внешними источниками энергии (СЭС/ДГУ),
- контроль зарядно-разрядных процессов АКБ.

Для расширения функциональных возможностей, в макет введен унифицированный коммуникационный интерфейс на базе Modbus TCP/RTU и CAN, обеспечивающий интеграцию оборудования в верхний уровень управления и SCADA-систему. Этот интерфейс позволяет реализовывать:

- сбор данных в реальном времени и их логирование,
- дистанционную диагностику и анализ режимов работы,
- передачу внешним алгоритмам прогнозирования (солнечной генерации, нагрузки) и оптимизации состава включенных источников,
- автоматическую выдачу команд на изменение режимов работы (пуск/останов ДГУ, изменение мощности инверторов, переключение нагрузок).

Таким образом, система управления макета не ограничивается локально встроенной автоматикой Victron, а предусмотрена как открытая программно-техническая платформа, пригодная для внедрения алгоритмов прогнозирования, оптимизации, интеллектуального управления и интеграции в единый диспетчерский контур.

Основные электротехнические параметры оборудования сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Основные электротехнические параметры оборудования СДК

Наименование	Оборудование в составе	Модель	Основные технические характеристики
ДГУ 1	Дизельный двигатель	АД-12 (ММЗ)	Номинальная мощность (кВт/кВА) – 12/15; номинальное напряжение – 400 В; номинальная частота – 50 Гц; частота вращения вала двигателя – 1500 об/мин
	Силовой генератор	Marelli Motori MJB 160 MA4	Мощность (кВт/кВА) – 16/20; напряжение АС – 380/400 В; частота – 50 Гц; частота вращения – 1500 об/мин
	Шкаф управления ДГУ	DEIF Multi-line AGC 200	АРВ, АРЧ, автоматическая синхронизация, поддержка Modbus RTU
ДГУ 2	Дизельный двигатель	АД-30 (ММЗ)	Номинальная мощность (кВт/кВА) – 30/37,5; номинальное напряжение – 400 В; номинальная частота – 50 Гц; частота вращения вала двигателя – 1500 об/мин
	Силовой генератор	Marelli Motori MJB 200 SA4	Мощность (кВт/кВА) – 33,6/42; напряжение АС – 380/400 В; частота – 50 Гц; частота вращения – 1500 об/мин
	Шкаф управления ДГУ	DEIF Multi-line AGC 200	АРВ, АРЧ, автоматическая синхронизация, поддержка Modbus RTU
СНЭ 1	Подсистема преобразования – кластер двунаправленных инверторов	Victron Energy Quattro 48/10000/140	Напряжение DC – 48 В; мощность преобразователя – 10 кВА; напряжение АС – 230 В; частота – 50 Гц
	Подсистема накопления энергии – кластер свинцово-кислотных аккумуляторов	Yellow GB 12-200	Напряжение – 12 В; технология GEL; максимальный разрядный ток – 1500 А; саморазряд – 3 % в месяц; номинальная емкость: – 10-часовой разряд – 200 А·ч; – 5-часовой разряд – 166 А·ч; – 1-часовой разряд – 120 А·ч

Продолжение таблицы 3.1

Наименование	Оборудование в составе	Модель	Основные технические характеристики
СЭС 1	Имитатор ФЭМ	Delta Elektronika BV SM 660-AR-11	Напряжение DC – 0-660 В; ток DC – 0-11 А (до 330 В); 0-5,5 (от 330 В)
	Подсистема преобразования СЭС	SMA Sunny Tripower STP 12000TL-20	Напряжение DC – 440-800 В; мощность инвертора – 12 кВА; напряжение AC – 400 В (линейное); частота – 50 Гц; интерфейс/протокол передачи данных – Ethernet/Modbus TCP
АСУ СДК	Программируемый логический контроллер	Mitsubishi Electric MELSEC FX3u	Напряжение питания – AC 220 В; количество аналоговых входов/выходов – 64/64; интерфейс передачи данных – Ethernet, RS-485

3.3 3-D моделирование размещения оборудования

Перед началом настоящей работы макет СДК представлял собой следующую конфигурацию оборудования, представленную на рисунке 3.1, модель которой спроектирована с помощью САПР.

В таблице 3.2 представлены наименования оборудования согласно нумерованию на рисунке 3.4.

Таблица 3.2 – Оборудование СДК в начале года

Номер оборудования	Наименование
1	Батарейные инверторы
2	Щит учетно-распределительный
3	Щит бесперебойного питания
4	Инвертор
5	Щит с монтажной панелью
6	Кондиционер
7	Система отопления
8	Шина постоянного тока
9	Стойка аккумуляторных батарей
10	Рубильник аккумуляторных батарей
11	Шкаф автоматики

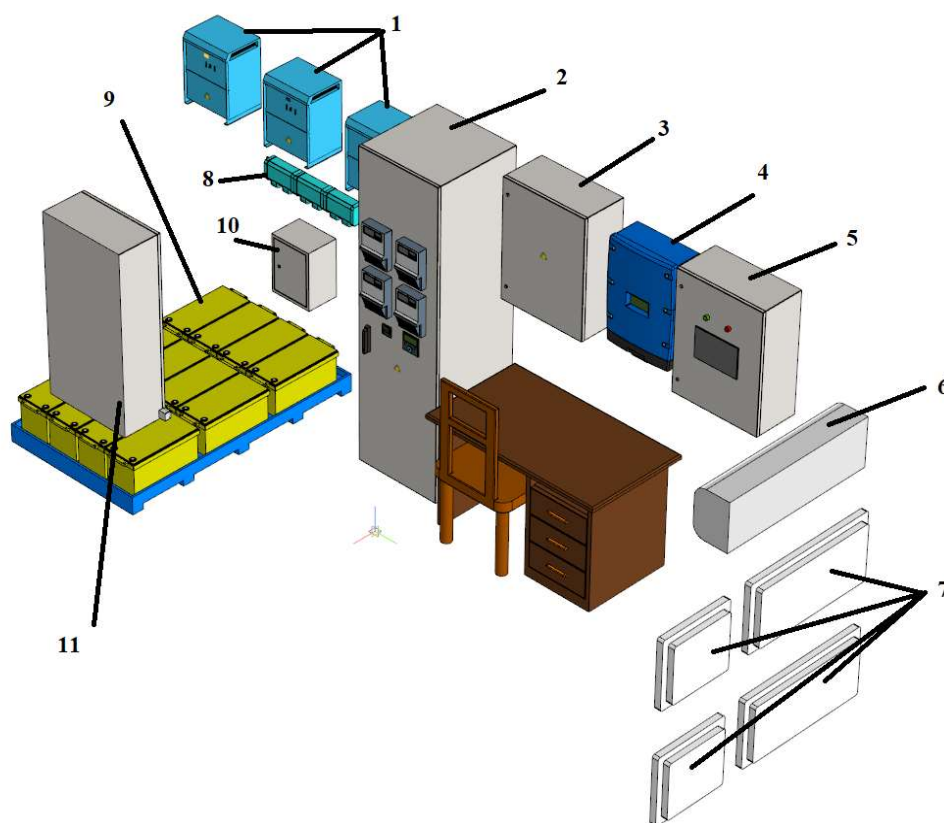


Рисунок 3.4 – Расположение оборудования в макете СДК в начале года

В течение года был рассмотрен план внедрения в систему СДК массива суперконденсаторов, и была поставлена задача о планировании их размещения внутри комплекса. Для решения данного вопроса было разработано две 3-D модели размещения оборудования представленных на рисунке 3.5 и 3.6 и чертежи к ним (приложение В), для определения необходимых параметров кабельных линий для обоих случаев размещения массивов с целью минимизации потерь энергии.

В таблице 3.3 представлены наименования оборудования согласно нумерованию на рисунках 3.5 и 3.6.

Как видно из моделей, аккумуляторные батареи (12) были перемещены на вертикальные стойки в обоих случаях для экономии места в помещении и рубильник (11) к ним был также перемещен. Также добавились вертикальные стойки для суперконденсаторов (9) и рубильник (10) к ним. В приложении В видно, что при размещении массива суперконденсаторов, как на рисунке 3.5, длина проводов составит около 4 метров (формула (3.1)), а при размещении как на рисунке 3.6 (формула (3.2)) понадобится около 10 метров.

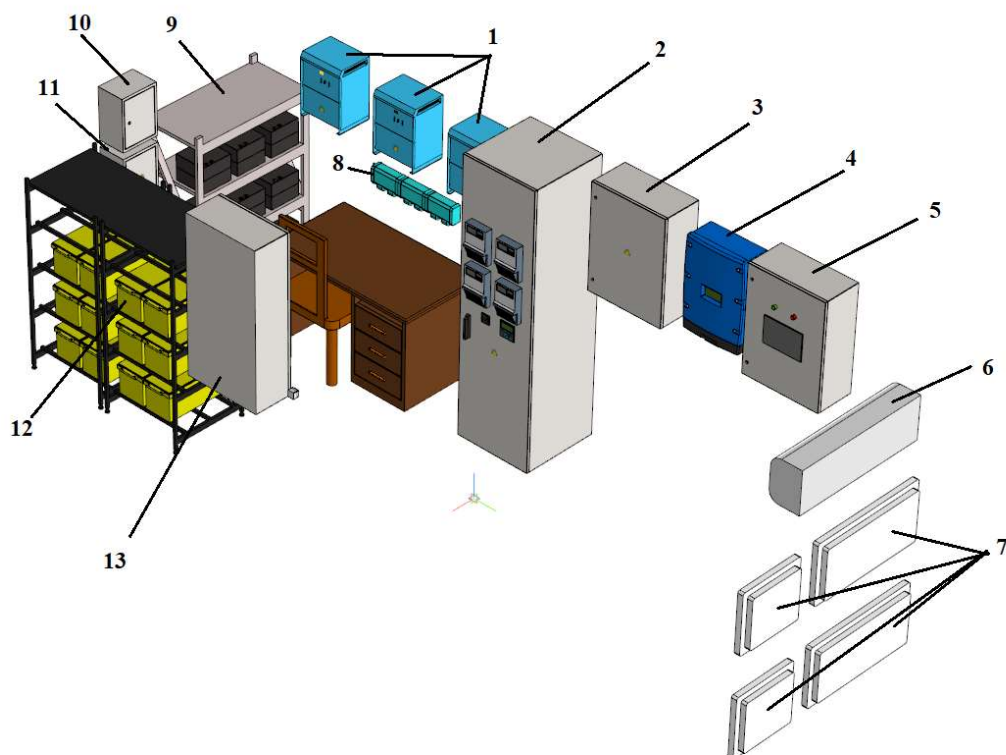


Рисунок 3.5 – Модель с размещением суперконденсаторов в левой части комплекса

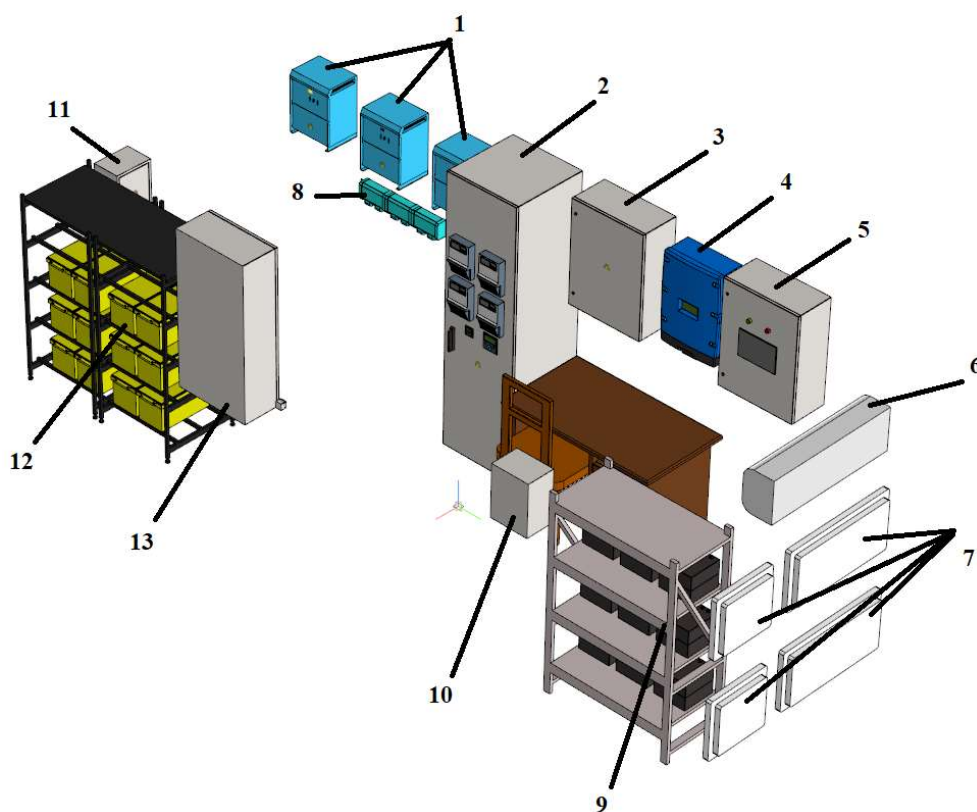


Рисунок 3.6 – Модель с размещением суперконденсаторов в правой части комплекса

Таблица 3.3 – Планируемое оборудование СДК

Номер оборудования	Наименование
1	Батарейные инверторы
2	Щит учетно-распределительный
3	Щит бесперебойного питания
4	Инвертор
5	Щит с монтажной панелью
6	Кондиционер
7	Система отопления
8	Шина постоянного тока
9	Стойка суперконденсаторов
10	Рубильник суперконденсаторов
11	Рубильник аккумуляторных батарей
12	Стойка аккумуляторных батарей
13	Шкаф автоматики

$$L_a = 0,3 + 0,045 + 1 + 0,045 + 0,5 + 0,15 + 0,35 + 0,3 + 0,35 + 0,3 + 0,35 + 0,15 = 3,84 \text{ м.} \quad (3.1)$$

$$L_b = 0,3 + 0,13 + 1 + 0,31 + 2,1 + 0,95 + 0,6 + 0,1 + 0,45 + 0,1 + 0,6 + 0,13 + 0,6 + 0,145 + 0,35 + 0,3 + 0,35 + 0,3 + 0,35 + 0,67 = 9,835 \text{ м,} \quad (3.2)$$

где L_a – длина провода на рисунке 3.5;

L_b – длина провода на рисунке 3.6.

Таким образом, размещение оборудования как на рисунке 3.5 будет более целесообразным.

3.4 Принципиальные электрические схемы

Общая принципиальная схема полигона НИУ «МЭИ» приведена в приложении В.

Полигон представляет собой гибридный энергетический комплекс, включающий солнечные панели, аккумуляторную систему резервирования на 48 В, суперконденсаторный блок, силовые инверторы переменного тока, а также распределительные шкафы ЩВР, ЩПТ, ЩБП и ЩУР.

Система обеспечивает питание нагрузки в аудитории Г-208а, собственных нужд испытательного полигона (СДК), а также активных и реактивных нагрузок в последнем. Кроме того, комплекс имеет подключение к внешней электрической сети.

Солнечная электростанция, подключенная к контроллеру заряда в составе ЩПТ, работает исключительно на заряд аккумуляторной батареи 48 В и не осуществляет прямую выдачу электроэнергии в сеть. Контроллер заряда обеспечивает прием мощности от СЭС и ее передачу на свинцово-кислотный аккумуляторный блок.

Дополнительно аккумуляторная батарея может заряжаться от трех однофазных гибридных инверторов SMA Sunny Island 5048, объединенных в трехфазную систему. Эти инверторы подключены как к шине внешней сети (через ЩВР), так и к общей шине трех однофазных сетевых инверторов SAMIL SP-SR-V5-EN, SOFAR Sunny Dog Series (1.1K-3KTL) и SMA Sunny Boy 5.0. Sunny Island 5048 формируют опорное напряжение и частоту, обеспечивая возможность корректной работы сетевых инверторов даже при отсутствии внешней сети. Каждый из сетевых инверторов синхронизируется с Sunny Island и получает от них условия для выдачи мощности. На сетевые инверторы, в свою очередь, подается электроэнергия от других солнечных установок.

Такая архитектура обеспечивает гибкую перераспределенную схему питания, позволяет задействовать дополнительные источники, стабильно поддерживать заряд АКБ и сохранять работоспособность комплекса при отсутствии генерации локальной СЭС или внешнего сетевого напряжения.

В случае избыточной генерации второй СЭС производимая электроэнергия через соответствующие инверторы может быть выдана во внешнюю электрическую сеть.

При пропадании напряжения внешней сети питание собственных нужд аудитории Г-208а (через ЩВР Г-208а) автоматически обеспечивается от аккумуляторной батареи через соответствующие инверторы.

если же отсутствует генерация как от СЭС, так и от аккумуляторов, то собственные нужды переходят на питание непосредственно от внешней сети, поступающей через ЩВР.

В правой части схемы расположена испытательная зона полигона, представляющая собой солнечно-дизельный комплекс (СДК). В приложении В приведены детальные принципиальные схемы СДК для двух конфигураций – до интеграции суперконденсаторов (до начала работ) и после их установки (на данном этапе работ).

Важно отметить, что сам полигон СДК является стендом для моделирования различных вариантов работы, и его техническая инфраструктура (имитаторы ФЭМ, собственные нужды, системы управления и вспомогательные цепи) питается от внешней электрической сети. Внутри полигона на этой базе формируется моделируемая автономная энергосистема, работающая независимо от внешней сети и используемая для проведения исследований. Тем самым стенд обеспечивает энергетическую автономию моделируемой системы, но сам остается подключенным к сети для питания своих сервисных нагрузок.

В качестве источника солнечной генерации в моделируемой системе используются имитаторы фотоэлектрических модулей, размещенные в ЩУР и питающиеся от внешней сети полигона. Имитаторы подключены к входу инвертора SMA Sunny Tripower 12000TL,

который преобразует имитируемую солнечную мощность постоянного тока в трехфазное переменное напряжение и подает его на общую переменную шину гибридного комплекса.

К этой же шине подключена дизельная электростанция, состоящая из двух ДГУ номиналом 12 и 30 кВт. Генераторы обеспечивают резервное питание автономной моделируемой системы и позволяют воспроизводить режимы параллельной работы дизельного и солнечного источников.

Переменная шина также связана с двумя нагрузочными модулями – активным и реактивным, что позволяет моделировать различные профили потребления и задавать требуемые режимы испытаний.

К общей шине подключены три двунаправленных инвертора Victron, обеспечивающие обмен энергией между переменной частью моделируемой системы и ее накопителями. Инверторы питаются от аккумуляторного блока напряжением 48 В. Параллельно аккумуляторам подключены девять суперконденсаторов, которые сглаживают динамические переходные процессы и повышают устойчивость моделируемой энергосистемы.

Инверторы Victron имеют доступ к внешней сети полигона, что позволяет при необходимости заряжать аккумуляторную батарею и суперконденсаторы в сервисных или подготовительных режимах. Однако все экспериментальные исследования проводятся в режиме полной автономии моделируемой системы, когда питание нагрузки формируется только за счет имитаторов ФЭМ, накопителей и дизель-генераторов.

4 Экспериментальный образец гибридной СНЭ, позволяющий исследовать влияние электрохимических аккумуляторов и суперконденсаторов на режимы работы АГЭК в переходных процессах

4.1 Линейные схемы

Моделируемая система представляет собой подсистему распределения и преобразования энергии постоянного тока 48 В, включающую аккумуляторный блок, суперконденсаторы, силовые DC-цепи и инверторы Victron, обеспечивающие работу комплекса в автономном режиме.

Однолинейная схема моделируемой системы изображена в приложении В.

4.1.1 Состав оборудования СДК

СДК включает в себя следующие элементы, обозначения которых приведены в таблицах 4.1 и 4.2:

1) аккумуляторная батарея – свинцово-кислотные аккумуляторы Yellow GB 12-200, объединенные в батарейный блок по схеме 4р3s, обеспечивающей номинальное системное напряжение 48 В и увеличенную емкость за счет параллельного соединения групп;

2) суперконденсаторный блок – девять модулей МСК-96-58, подключенных параллельно аккумуляторной батарее и используемых для сглаживания пиковых нагрузок, компенсации кратковременных просадок напряжения и повышения динамической устойчивости DC-шины 48 В;

3) инверторно-зарядный модуль – три двунаправленных инвертора Victron Energy Quattro 48/10000/140, работающих параллельно и обеспечивающих преобразование энергии между DC-шиной 48 В и переменной шиной комплекса, а также возможность зарядки аккумуляторов от внешней сети или генераторных источников;

4) коммутационная аппаратура – два выключателя-разъединителя (QS), установленные соответственно после аккумуляторного блока и после суперконденсаторного блока, обеспечивающие локальную коммутацию, безопасное обслуживание и возможность изоляции отдельных компонентов DC-секции;

5) сетевой инвертор – SMA Sunny Tripower STP 12000TL-20, подключенный к переменной шине и питаемый от имитаторов ФЭМ, установленных в шкафу ЩУР. Инвертор обеспечивает преобразование мощности имитаторов в трехфазное AC-напряжение;

6) шкафы управления и распределения:

– ЩУР (шкаф управления и распределения), содержащий имитаторы фотоэлектрических модулей и элементы коммутации солнечной части,

– ЩПБ (щит бесперебойного питания/распределительный блок), обеспечивающий прием, защиту и выдачу выходного напряжения на нагрузку полигона,

7) дизель-генераторные установки – две ДГУ мощностью 12 и 30 кВт:

– АД-12 (ММЗ) с силовым генератором Marelli Motori MJB 160 MA4,

– АД-30 (ММЗ) с генератором Marelli Motori MJB 200 SA4.

Обе ДГУ подключены к переменной шине и используются для резервного питания комплекса и проведения испытаний в гибридных режимах.

Таблица 4.1 – Оборудование однолинейной схемы

Обозначение на схеме	Наименование оборудования	Тип/Параметры	Примечание
SB1.1....SB1.12	Свинцово-кислотный аккумулятор Yellow GB 12-200	Напряжение – 12 В; максимальный разрядный ток – 1500 А; саморазряд – 3 % в месяц; номинальная емкость: – 10-часовой разряд – 200 А·ч; – 5-часовой разряд – 166 А·ч; – 1-часовой разряд – 120 А·ч	Формирует АКБ1, АКБ2, АКБ3
SB2.1....SB2.9	Суперконденсатор МСК-96-58	емкость – 96 Ф; напряжение – 58 В; максимальный ток – 1000 А	Формирует СК1, СК2, СК3
QS1	Выключатель разъединитель ВР32-35В31250	Трехполюсный, с дугогасительной камерой; номинальный ток – 250 А	После блока АКБ
QS2	Выключатель разъединитель ВР32-35А70220-32 УХЛЗ	Трехполюсный, дугогасительная камера отсутствует; номинальный ток – 250 А	После блока суперконденсаторов
РАКБ	Щиток, где расположен QS1	-	-
РСК	Щиток, где расположен QS12	-	-

Продолжение таблицы 4.1

Обозначение на схеме	Наименование оборудования	Тип/Параметры	Примечание
АКБ-BUS	Общая минусовая шина блока АКБ с шунтом	-	-
СК-BUS	Общая минусовая шина блока СК с шунтом	-	-
АКБ1, АКБ2, АКБ3	Три параллельные полки с последовательно соединенными АКБ (4s3p)	-	-
СК1, СК2, СК3	Три параллельные полки с девятью параллельными СК	-	-
Шина Victron 1, Шина Victron 2, Шина Victron 3	Шина постоянного тока Victron	Номинал – 48 В; общий узел подключения АКБ и суперконденсаторов	Питание трех инверторов Victron (VA, VB, VC); объединяет все накопители
VA Инвертор Victron, VB Инвертор Victron, VC Инвертор Victron	Двунаправленный инвертор-зарядное устройство	Victron Energy Quattro 48/10000/140, 48 В, 10 кВА	Работа параллельно на АС-шину; обмен энергией между ДС-накопителями и нагрузками
ЩУР	Щит учетно-распределительный	Ввод ДГУ, питание имитаторов ФЭМ, распределение АС/DC-цепей	Коммутация ДГУ и ФЭМ, подача на инвертор SMA STP
ЩБП	Щит бесперебойного питания	3×230/400 В, распределение АС-цепей	Прием мощности от Victron и STP, питание нагрузок, автоматика и защита
ДГУ-1 12 кВт	Дизель-генераторная установка	АД-12 (ММЗ), генератор Marelli Motori MJB 160 MA4, 12 кВт	Основной источник генерации; параллельная работа с СЭС и Victron
ДГУ-2 30 кВт	Дизель-генераторная установка	АД-30 (ММЗ), генератор Marelli Motori MJB 200 SA4, 30 кВт	Основной источник генерации; параллельная работа с СЭС и Victron

Таблица 4.2 – Провода и кабели однолинейной схемы

Обозначение на схеме	Марка кабеля	Сечение, мм ²	Кол-во жил/параллелей	Длина, м	Откуда → Куда
РАКБ1+	ПуГВ	50	1	0,7	АКБ1+ → РАКБ
РАКБ2+	ПуГВ	50	1	0,7	АКБ2+ → РАКБ
РАКБ3+	ПуГВ	50	1	0,7	АКБ3+ → РАКБ
РАКБ1-	ПуГВ	50	1	2,1	АКБ1- → АКБ-BUS
РАКБ2-	ПуГВ	50	1	2,1	АКБ2- → АКБ-BUS
РАКБ3-	ПуГВ	50	1	2,1	АКБ3- → АКБ-BUS
РСК1+	ПуГВ	50	1	1,4	СК1+ → РСК
РСК2+	ПуГВ	50	1	1,95	СК2+ → РСК
РСК3+	ПуГВ	50	1	2,2	СК3+ → РСК
СК-BUS-	ПуГВ	25	1	1,4	СК1- → СК-BUS
СК-BUS-	ПуГВ	25	1	1,05	СК2- → СК-BUS
СК-BUS-	ПуГВ	25	1	1,3	СК3- → СК-BUS
V_lynx1+(1)	ПуГВ	50	1	3,5	РАКБ → Шина Victron1+
V_lynx1+(2)	ПуГВ	50	1	3,5	РАКБ → Шина Victron1+
V_lynx1+(3)	ПуГВ	50	1	3,5	РАКБ → Шина Victron1+
V_lynx1+(4)	ПуГВ	50	1	3,6	РСК → Шина Victron1+
V_lynx1-(1)	ПуГВ	50	1	3,5	АКБ-BUS → Шина Victron1-
V_lynx1-(2)	ПуГВ	50	1	3,5	АКБ-BUS → Шина Victron1-
V_lynx1-(3)	ПуГВ	50	1	3,5	АКБ-BUS → Шина Victron1-

Продолжение таблицы 4.2

Обозначение на схеме	Марка кабеля	Сечение, мм ²	Кол-во жил/параллелей	Длина, м	Откуда → Куда
V_linx1-(4)	ПуГВ	50	1	1,05	АКБ-BUS → Шина Victron1-
2*VA1.1+	ПуГВ	50	1/2	1,25	Шина Victron2+ → Инвертор VA
2*VB1.1+	ПуГВ	50	1/2	1,9	Шина Victron3+ → Инвертор VB
2*VC1.1+	ПуГВ	50	1/2	1,35	Шина Victron3+ → Инвертор VC
2*VA1.1-	ПуГВ	50	1/2	1,25	Шина Victron2- → Инвертор VA
2*VB1.1-	ПуГВ	50	1/2	1,9	Шина Victron3- → Инвертор VB
2*VC1.1-	ПуГВ	50	1/2	1,35	Шина Victron3- → Инвертор VC
VA_ЩБП	ПВС	10	3	2,75	Инвертор VA → ЩБП
VB_ЩБП	ПВС	10	3	2,2	Инвертор VB → ЩБП
VC_ЩБП	ПВС	10	3	1,65	Инвертор VC → ЩБП
VA_ЩУР_IN1	ВВГ	10	3	3,5	Инвертор VA → ЩУР
VA_ЩУР_IN2	ВВГ	10	3	3,5	Инвертор VA → ЩУР
VB_ЩУР_IN1	ВВГ	10	3	2,95	Инвертор VB → ЩУР
VB_ЩУР_IN2	ВВГ	10	3	2,95	Инвертор VB → ЩУР
VC_ЩУР_IN1	ВВГ	10	3	2,4	Инвертор VC → ЩУР
VC_ЩУР_IN2	ВВГ	10	3	2,4	Инвертор VC → ЩУР

Продолжение таблицы 4.2

Обозначение на схеме	Марка кабеля	Сечение, мм ²	Кол-во жил/параллелей	Длина, м	Откуда → Куда
ДГУ12_ЩУР	-	-	-	-	ДГУ 12 кВт → ЩУР
ДГУ30_ЩУР	-	-	-	-	ДГУ 30 кВт → ЩУР

4.1.2 Логическая структура и пути прохождения энергии

Энергетические потоки в подсистеме СДК формируются тремя основными источниками: имитаторами фотоэлектрических модулей, аккумуляторно-суперконденсаторным блоком и дизель-генераторными установками. Все источники взаимодействуют через общую переменную и постоянную шины, обеспечивая питание активной, реактивной нагрузки и собственных нужд полигона. Рассмотрим особенности работы некоторых из этих элементов:

1) Работа сетевого инвертора (SMA Sunny Tripower STP 12000TL-20).

Инвертор получает постоянный ток от двух имитаторов ФЭМ, расположенных в шкафу ЩУР и питаемых от внешней сети через ЩБП. Имитаторы воспроизводят электрические характеристики солнечных панелей. STP преобразует поступающий DC-ток в трехфазное переменное напряжение и подает его на нагрузку: активный нагрузочный модуль, реактивный нагрузочный модуль и систему собственных нужд полигона. Таким образом, STP формирует независимую «солнечную» фазу генерации на переменной шине комплекса;

2) Работа двунаправленных инверторов Victron Energy Quattro.

Двунаправленные инверторы Victron получают питание от блока накопителей, состоящего из аккумуляторной батареи и параллельно подключенного суперконденсаторного массива. Все накопители соединены через общие DC-шины Victron, представляющие собой узловую точку, куда сходятся все провода от АКБ и суперконденсаторов и откуда уже расходятся соединения на каждый из трех инверторов Quattro.

Victron преобразует энергию постоянного тока из накопителей в трехфазный переменный ток и подает ее на нагрузку: активную, реактивную и собственные нужды полигона. Линии переменного тока от инверторов Victron вводятся в ЩБП, который обеспечивает распределение и защиту АС-цепей.

Помимо режима инвертирования, Victron может работать в режиме зарядного устройства, используя два сетевых входа:

- вход 1 – подключение к солнечной линии (АС-выход сетевого инвертора STP),
- вход 2 – подключение к дизель-генераторным установкам.

Это обеспечивает возможность заряда аккумуляторов и суперконденсаторов от внешних АС-источников при необходимости;

3) Работа дизель-генераторных установок.

Дизельная станция включает две параллельно работающие ДГУ мощностью 12 и 30 кВт (АД-12 и АД-30). Обе установки подают вырабатываемую ими трехфазную мощность на общую переменную шину комплекса, обеспечивая питание активной и реактивной нагрузки, а также системы собственных нужд полигона. Ввод кабелей от ДГУ осуществляется в контейнер полигона через шкаф ЩУР, где производится их коммутация и подача на распределительную шину.

Таким образом, подсистема СДК представляет собой гибридный узел, где солнечная электроэнергия (через имитаторы), накопители энергии и дизель-генераторные установки объединены единым силовым контуром. Энергия может направляться в нагрузку как напрямую от источников, так и через инверторы Victron, а накопители обеспечивают буферизацию, сглаживание переходных процессов и автономную работу комплекса при отсутствии внешнего питания.

4.1.3 Основные режимы работы

Система накопления в составе моделируемой автономной энергосистемы включает аккумуляторную батарею 48 В и параллельно подключенный суперконденсаторный блок. Основным интерес в рамках проводимых исследований представляет работа системы именно в режимах разряда, поскольку они определяют способность комплекса удерживать напряжение при динамических изменениях нагрузки.

В реальных автономных системах возможны кратковременные провалы напряжения, возникающие, как правило, при пуске электрических двигателей или других нагрузок с высоким пусковым током. В таких ситуациях аккумуляторная батарея может оказаться недостаточно динамичной для мгновенной компенсации просадки, что приводит к уменьшению напряжения на переменной шине. При этом сетевой солнечный инвертор имеет жесткие требования к диапазону напряжений: при превышении порогов допуска по снижению напряжения он отключается от сети для защиты собственного оборудования.

Именно предотвращение таких отключений и является ключевым мотивом исследования поведения суперконденсаторов.

Суперконденсаторный блок отличается высокой удельной мощностью и малыми внутренними потерями, что позволяет ему моментально отдавать энергию в шину в

моменты резких нагрузочных всплесков. В отличие от аккумуляторов, суперконденсаторы способны обеспечить кратковременный, но мощный импульс тока, стабилизируя напряжение и предотвращая отключение инверторов.

Для анализа их эффективности рассматриваются режимы разряда накопительной системы, возникающие при:

- пуске высокомоментных динамических нагрузок (имитация электродвигателей, активная и реактивная нагрузка),
- ослаблении генерации СЭС – временное снижение мощности от имитаторов ФЭМ,
- переходных процессах в работе дизельной станции, в том числе при переключениях нагрузки.

На уровне силовой архитектуры инвертор Victron играет роль двунаправленного преобразователя.

Он одновременно:

- подключен к АС-шине, формируемой дизельными генераторами и (в режиме полигона) внешней сетью,
- связан по DC-шине с аккумуляторами и суперконденсаторами.

Однако в моделируемой автономной системе вместо внешней сети используется СЭС, представленная имитаторами ФЭМ и сетевым инвертором STP. Таким образом, Victron выступает в качестве основного элемента связи между переменной шиной экспериментальной системы и ее накопителями.

В итоговой конфигурации моделируемая система работает полностью автономно: переменная шина формируется только за счет мощности дизель-генераторов и сетевого инвертора STP, а качество напряжения поддерживается аккумуляторной батареей и суперконденсаторами. Исследования сосредоточены на том, насколько эффективно суперконденсаторный блок компенсирует интервальные провалы напряжения и предотвращает отключение солнечного инвертора при динамических нагрузках.

4.1.4 Защита и коммутационная аппаратура

Система СДК оснащена комплексом защитных и коммутационных устройств, обеспечивающих безопасную эксплуатацию, возможность локального обслуживания и предотвращение аварийных режимов.

Защита постоянного тока реализована с помощью двух выключателей-разъединителей (QS), установленных соответственно на выходе аккумуляторного блока и на выходе суперконденсаторного массива. Они обеспечивают ручное отключение

отдельных накопителей от DC-шины, что необходимо при проведении технического обслуживания, замены модулей или локализации неисправностей.

DC-шина инверторов Victron защищена встроенными средствами мониторинга, контролирующими ток заряда/разряда, температуру и напряжение на каждом канале. Это предотвращает перегрузку накопителей и обеспечивает реализацию ограничений по динамическим токам.

В цепях переменного тока защиту обеспечивают автоматические выключатели, расположенные в шкафах ЩУР и ЩБП. Они выполняют функции защиты от коротких замыканий, перегрузки и недопустимых отклонений параметров сети. Для дизель-генераторов предусмотрена встроенная защита генераторных установок (по току, напряжению и частоте), предотвращающая некорректную работу при параллельной работе с инвертором STP и инверторами Victron.

Коммутация между различными источниками (СЭС, ДГУ, накопители) обеспечивается через автоматические и ручные коммутационные аппараты, расположенные в распределительных шкафах, что позволяет гибко изменять режимы питания и задавать условия экспериментов.

Таким образом, система защиты и коммутации гарантирует безопасное взаимодействие всех элементов СДК, стабильную работу инверторных устройств и предсказуемое поведение системы в переходных режимах.

4.1.5 Итоговое назначение моделируемой системы в составе полигона

Подсистема СДК выполняет роль автономного гибридного энергетического узла, интегрированного в лабораторный полигон НИУ «МЭИ» для проведения экспериментальных исследований. Основное назначение подсистемы заключается в создании контролируемой среды, моделирующей работу реальных автономных энергетических систем с использованием солнечных источников, аккумуляторов, суперконденсаторов и дизельных генераторов.

СДК обеспечивает:

- формирование автономной переменной шины с возможностью подключения разнообразных нагрузок,
- исследование динамических режимов работы накопителей, включая оценку эффективности суперконденсаторов в условиях провалов напряжения,
- проверку устойчивости работы сетевых инверторов при изменении профиля нагрузки и параметров генерации,

- моделирование сценариев взаимодействия дизельных установок, солнечных инверторов и системы накопления,
- возможность воспроизведения аварийных, переходных и режимов с высоким пусковым током без риска для оборудования полигона.

В результате подсистема СДК служит универсальной платформой, позволяющей проводить всесторонние исследования поведения энергоустановок в автономном режиме, а также отрабатывать алгоритмы поддержания напряжения и предотвращения отключения солнечных инверторов за счет применения суперконденсаторов.

4.2 Система измерения электрических величин

Для измерения электрических величин в системе было закуплено оборудование, в которое входят измерительные датчики, программируемые логические контроллеры (ПЛК) и модули к нему.

Ввиду того, что ПЛК может получать на свои входы только дискретные значения сигналов, а датчики выдают аналоговые сигналы, к ПЛК были закуплены модули аналогового ввода, которые ПЛК способен обрабатывать и выдавать по ним информацию. В таблице 4.3 представлены измерительные датчики, их количество и тип выходного сигнала.

Таблица 4.3 – Измерительные датчики

Датчик	Измерительная величина	Выходной сигнал	Кол-во
ПИТ-500-УА-Б30	Ток (I)	0...5 В	5
ПИН-50-У-4/20-П	Напряжение (U)	4...20 мА	5
ПИН-300-У-4/20-П	Напряжение (U)	4...20 мА	5
ПИТ-20-У-4/20-Б14	Ток (I)	4...20 мА	5
ПИТ-50-У-4/20-Б14	Ток (I)	4...20 мА	5
ПИН-100-У-4/20-П	Напряжение (U)	4...20 мА	5

Для того, чтобы понимать, сколько мы сможем обрабатывать сигналов с датчиков, нужно проанализировать количество аналоговых входов у закупленных к нему модулей (таблица 4.4).

Исходя из нужд лаборатории, на данный момент планируется внедрить в систему 11 датчиков, из которых восемь датчиков тока и три датчика напряжения. Изобразим датчики на линейной схеме (приложение В) и приведем их количество в таблице 4.5.

Таблица 4.4 – Типы входных сигналов оборудования

Оборудование	Кол-во	Входы		
		Аналоговые		Дискретные
		Тип сигнала	Кол-во	Кол-во
ПЛК210-11-PL-BASE	2	-	-	4 (DI) 8 (FDI)
МВ210-101	2	0...5 мА; 0(4)...20 мА; ± 50 мВ; ± 1 В	8 (AI)	-
МВ210-102	1	0...5 мА; 0...20 мА; 4...20 мА; 0...1 В; 0...10 В	8 (FAI)	-

Таблица 4.5 – Обозначение датчиков и их количество

Датчик	Обозначение на схеме	Количество
ПИТ-500-УА-Б30	IA1, IA2, IA3, IA4, IA5	5
ПИН-50-У-4/20-П	UA1, UA2, UA3	3
ПИТ-50-У-4/20-Б14	3 * IA6	3

Также требуется пояснить, какую задачу будет выполнять тот или иной датчик. Назначение каждого из них приведем в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Назначение датчиков

Обозначение датчика	Назначение
IA1	Измерение тока системы АКБ
IA2	Измерение тока системы СК
IA3	Измерение тока одного СК
IA4	Измерение тока между шиной Victron и инвертором Victron
IA5	Измерение тока между шиной Victron и инвертором Victron
IA6	Измерение тока между инвертором Victron и ЩБП
UA1	Измерение напряжения всей системы накопления
UA2	Измерение напряжения на системе СК
UA3	Измерение напряжения на системе АКБ

Каждый датчик подключается к аналоговым входам модуля МВ210-102, который в свою очередь подключается к ПЛК, обрабатывающий входные сигналы с модуля.

Питание датчиков должно осуществляться блоком питания с выходным напряжением 15 В, однако на данный момент таких в лаборатории нет, планируется их

закупить в ближайшем времени. ПЛК и MB210-102 требуют питающее напряжение 24 В, которое им будет обеспечивать блок питания БП120К-24.

Принципиальная схема подключения датчиков к MB210, ПЛК и блокам питания изображена в приложении В.

4.3 Система мониторинга испытательного стенда «Гибридная СНЭ»

4.3.1 Общие положения

Программный пакет системы мониторинга представлен в виде изолированных подсистем, каждая из которых отвечает за наблюдение, регистрацию данных и, возможно, управление конкретного устройства или элемента испытательного стенда. Таким образом, система мониторинга содержит четыре компонента:

- 1) подсистема мониторинга и управления имитаторами нагрузки,
- 2) подсистема мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции,
- 3) подсистема мониторинга батарейных инверторов,
- 4) подсистема мониторинга солнечного инвертора.

Для удобства эксплуатации, обеспечения надежности системы, каждый компонент программного пакета реализуется в изолированной среде на основе Docker-образа. Docker-образ – это исполняемый пакет, который содержит все необходимое для запуска соответствующей подсистемы: программный код, среду выполнения, библиотеки и конфигурационные файлы. Все исполняемые пакеты реализуются на базе локального сервера.

Такой подход, помимо указанных выше преимуществ, также позволяет осуществить быстрый перенос всей системы на другие серверные мощности, редактировать подсистемы без отключения всей системы, обеспечивает гибкость и простоту эксплуатации стенда в следствие представления подсистем в виде готовых исполняемых компонентов, которые не требуют глубоких знаний и специальной подготовки.

4.3.2 Подсистема мониторинга и управления имитаторами нагрузки

Подсистема мониторинга и управления имитаторами нагрузки:

1) Общие сведения.

Система имитации нагрузки представлена двумя устройствами: нагрузочный модуль НМ-50-Т400-К2 и нагрузочный модуль НМ-Р-30-Т400-К2.

Для осуществления удаленного опроса технических устройств и записи их эксплуатационных показателей разработана подсистема мониторинга, осуществляющая информационный обмен при помощи сетевого протокола Modbus-TCP.

Целями подсистемы мониторинга является:

- считывание в реальном времени основных электрических параметров за один промышленный цикл частоты,
- преобразование шестнадцатеричного представления данных Modbus-регистров в читаемые величины,
- сохранение результатов в сетевую базу данных для последующего анализа, визуализации и использования в управляющих алгоритмах.

Для осуществления дистанционного управления системой имитации нагрузки разработана соответствующая подсистема, которая осуществляет отправку значений на устройства и контроль времени выполнения. Необходимые показатели мощности и времени задаются в виде списка, сформированного в формате файла «json». Информационный обмен реализуется аналогично подсистеме мониторинга – при помощи сетевого протокола Modbus-TCP;

2) Схема подключения.

Система имитации нагрузки подключена к локальной вычислительной сети при помощи Ethernet интерфейса. В LAN располагается серверное оборудование, которое осуществляет пуск и реализацию программных компонентов подсистем мониторинга и управления нагрузкой. Принцип взаимодействия устройства с серверным оборудованием и программными компонентами аналогичен для обоих модулей имитации нагрузки. Логическая схема связи элементов локальной вычислительной сети с устройствами системы имитации представлена на рисунке 4.1.

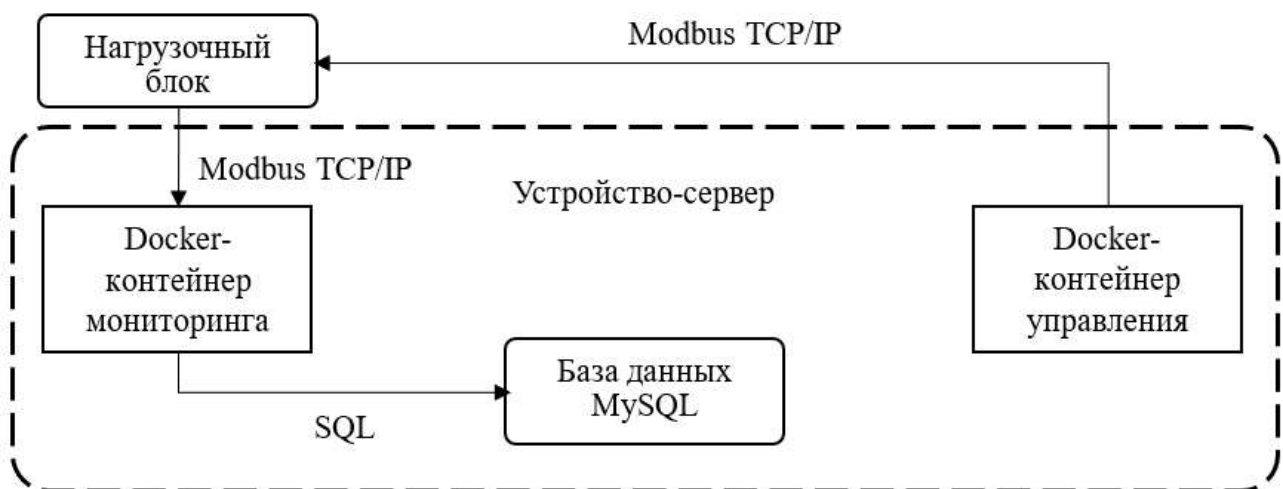


Рисунок 4.1 – Логическая схема взаимодействия элементов подсистемы мониторинга и управления имитаторами нагрузки

В данной схеме модули нагрузки выступают в качестве Modbus-серверов, к которым обращаются программные компоненты, реализованные в изолированных контейнерах на общем сервере;

3) Адресация и измеряемые величины.

Измеряемые величины могут быть представлены одним или несколькими регистрам Modbus в соответствии с картой, заложенной производителем. Формат описания представлен следующими параметрами:

- а) регистр – адреса, по которым располагаются искомые величины,
- б) назначение – содержит название параметра,
- в) доступ – показатель возможности чтения и записи параметра (R – «read only», только для чтения; W – «write only», только для записи; W/R – доступны и чтение, и запись параметра),
- г) тип – метод интерпретации значения, тип данных:
 - WORD – 16-битное беззнаковое число,
 - WORD32 – 32-битное беззнаковое число, младшее слово вперед,
 - WORD64 – 64-битное беззнаковое число, младшее слово вперед,
 - INT – 16-битное число со знаком,
 - INT32 – 32-битное число со знаком, младшее слово вперед,
 - FLOAT – Число в формате IEEE. 2 регистра, младшее слово вперед,
- д) примечание – содержит единицы измерения и комментарии.

Параметры, считываемые системой мониторинга см. в таблицах 4.7 и 4.8.

Таблица 4.7 – Параметры блока активной нагрузки, регистрируемые подсистемой мониторинга

Регистр	Назначение	Доступ	Тип	Примечание
12	Текущий режим управления	R	WORD	1 – МЕСТ 2 – ДИСТ
30	Доступная номинальная мощность	R	INT	кВт
50-51	Напряжение U1	R	FLOAT	В
52-53	Напряжение U2	R	FLOAT	В
54-55	Напряжение U3	R	FLOAT	В
62-63	Ток I1	R	FLOAT	А
64-65	Ток I2	R	FLOAT	А
66-67	Ток I3	R	FLOAT	А
68-69	Суммарная активная мощность фаз	R	FLOAT	кВт
70-71	Суммарная реактивная мощность фаз	R	FLOAT	кВАр
72-73	Суммарная полная мощность фаз	R	FLOAT	кВА
76-77	Общий коэффициент мощности	R	FLOAT	-

Таблица 4.8 – Параметры блока реактивной нагрузки, регистрируемые подсистемой мониторинга

Регистр	Назначение	Доступ	Тип	Примечание
10	Текущий режим управления	R	WORD	1 – МЕСТ 2 – ДИСТ 3 – ДОП
18	Макс. доступная мощность	R	INT	ВАр
22-23	Напряжение U1	R	FLOAT	В
24-25	Напряжение U2	R	FLOAT	В
26-27	Напряжение U3	R	FLOAT	В
34-35	Ток I1	R	FLOAT	А
36-37	Ток I2	R	FLOAT	А
38-39	Ток I3	R	FLOAT	А
40-41	Суммарная активная мощность фаз	R	FLOAT	кВт
42-43	Суммарная реактивная мощность фаз	R	FLOAT	кВАр
44-45	Суммарная полная мощность фаз	R	FLOAT	кВА
48-49	Общий коэффициент мощности	R	FLOAT	-

Параметры, отправляемые системой управления представлены в таблицах 4.9 и 4.10;

Таблица 4.9 – Параметры блока активной нагрузки, отправляемые подсистемой управления

Регистр	Назначение	Доступ	Тип	Примечание
31	Уставка нагрузки	W	INT	кВт

Таблица 4.10 – Параметры блока реактивной нагрузки, отправляемые подсистемой управления

Регистр	Назначение	Доступ	Тип	Примечание
19	Текущая мощность	R/W	INT	ВАр

4) Структура базы данных.

Для хранения данных подсистемы мониторинга показателей системы имитации нагрузки используется реляционная база данных MySQL. Данный тип БД выбран благодаря табличной модели, поддержке целостности данных и удобству выполнения аналитических SQL-запросов. Все параметры, считанные подсистемой по протоколу Modbus TCP/IP, после обработки записываются в таблицы, соответствующие устройству (см. таблицы 4.11 и 4.12).

Таблица 4.11 – Структура таблицы данных модуля активной нагрузки

Наименование	Тип данных	Состояние	Единица	Наименование параметра
id	bigint	Авто	-	Идентификатор
ts	timestamp	Авто	-	Время получения параметров
mode	int	Авто	-	Режим
u_l1	float	Чтение	В	Напряжение фазы L1
u_l2	float	Чтение	В	Напряжение фазы L2
u_l3	float	Чтение	В	Напряжение фазы L3
i_l1	float	Чтение	А	Ток фазы L1
i_l2	float	Чтение	А	Ток фазы L2
i_l3	float	Чтение	А	Ток фазы L3
cos_phi	float	Чтение	-	Коэффициент мощности
p_available	float	Чтение	кВт	Доступная активная мощность
p_active_sum	float	Чтение	кВт	Активная мощность
p_reactive_sum	float	Чтение	кВАр	Реактивная мощность
p_total_sum	float	Чтение	кВА	Полная мощность

Таблица 4.12 – Структура таблицы данных модуля реактивной нагрузки

Наименование	Тип данных	Состояние	Единица	Наименование параметра
id	bigint	Авто	-	Идентификатор
ts	timestamp	Авто	-	Время получения параметров
mode	int	Авто	-	Режим
u_l1	float	Чтение	В	Напряжение фазы L1
u_l2	float	Чтение	В	Напряжение фазы L2
u_l3	float	Чтение	В	Напряжение фазы L3
i_l1	float	Чтение	А	Ток фазы L1
i_l2	float	Чтение	А	Ток фазы L2
i_l3	float	Чтение	А	Ток фазы L3
cos_phi	float	Чтение	-	Коэффициент мощности
q_available	float	Чтение	ВАр	Доступная активная мощность
q_active_sum	float	Чтение	кВт	Активная мощность
q_reactive_sum	float	Чтение	кВАр	Реактивная мощность
q_total_sum	float	Чтение	кВА	Полная мощность

Формат описания полей таблицы:

а) тип данных – формат хранения значения в БД (для всех измеряемых параметров используется float, для идентификатора – bigint, для временной метки – timestamp),

б) состояние – режим доступа к полю БД:

- автоматически формируется (для id и ts),
- чтение (параметры, приходящие от устройства),
- запись (параметры, передаваемые устройству),

в) единица – единица измерения параметра;

5) Подкомпонент мониторинга.

Программный код мониторинга предназначен для организации непрерывного обмена данными между модулями имитации нагрузки и реляционной базой данных MySQL.

Для работы используются следующие входные данные:

- а) IP-адрес устройства (соответствующего модуля имитации нагрузки),
- б) TCP-порт Modbus,
- в) unit_id устройства в Modbus системе,
- г) карта регистров (адреса, количество регистров, тип данных) в виде конфигурационного файла формата «.json»,
- д) параметры подключения к БД (домен, сетевой порт, наименование БД, имя пользователя, пароль) в виде конфигурационного файла формата «setting.ini».

На выходе программного компонента формируется словарь всех искомых элементов и выполняется запись его элементов в поля соответствующих таблиц базы данных при отсутствии в ней данных или их обновление, актуализируя рабочие параметры опрашиваемого устройства. Блок-схема реализованного программного компонента мониторинга системы имитации нагрузки представлена на рисунке 4.2;

б) Подкомпонент управления.

Программный код управления предназначен для организации быстрой смены уставок устройств имитации нагрузки и реляционной базой данных MySQL. Для работы используются следующие входные данные:

- а) IP-адрес устройства (соответствующего модуля имитации нагрузки),
- б) TCP-порт Modbus,
- в) unit_id устройства в Modbus системе,
- г) расписание эксперимента в виде файла формата «.json» (см. приложение Б),
- д) параметры подключения к БД (домен, сетевой порт, наименование БД, имя пользователя, пароль) в виде конфигурационного файла формата «.ini».

Результатом работы программного компонента является отправка и контроль значений уставок нагрузки согласно программе проводимого испытания, а также соблюдение временных уставок поддержания необходимых значений. Блок-схема представлена на рисунке 4.3;

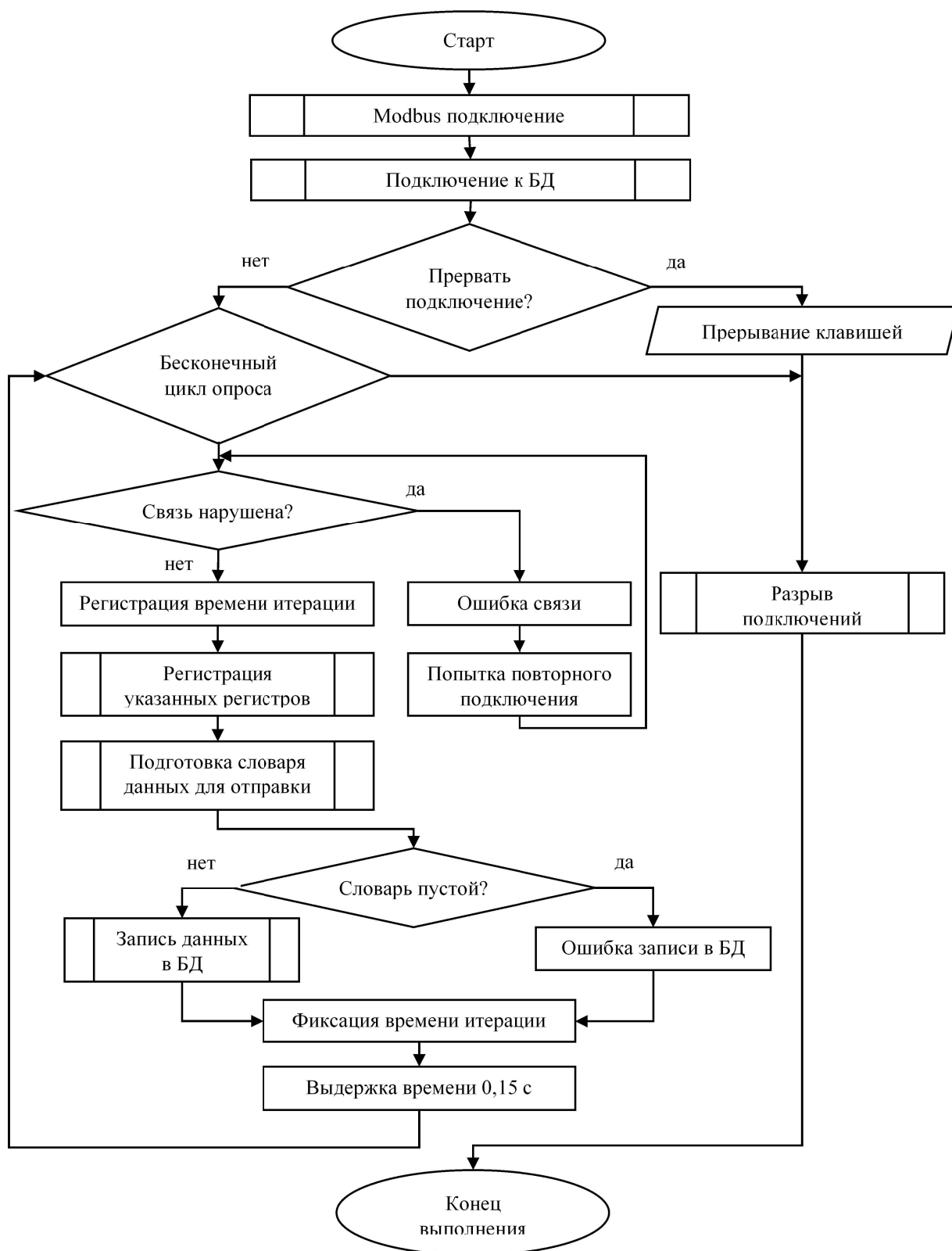


Рисунок 4.2 – Блок-схема программного компонента мониторинга имитаторов нагрузки

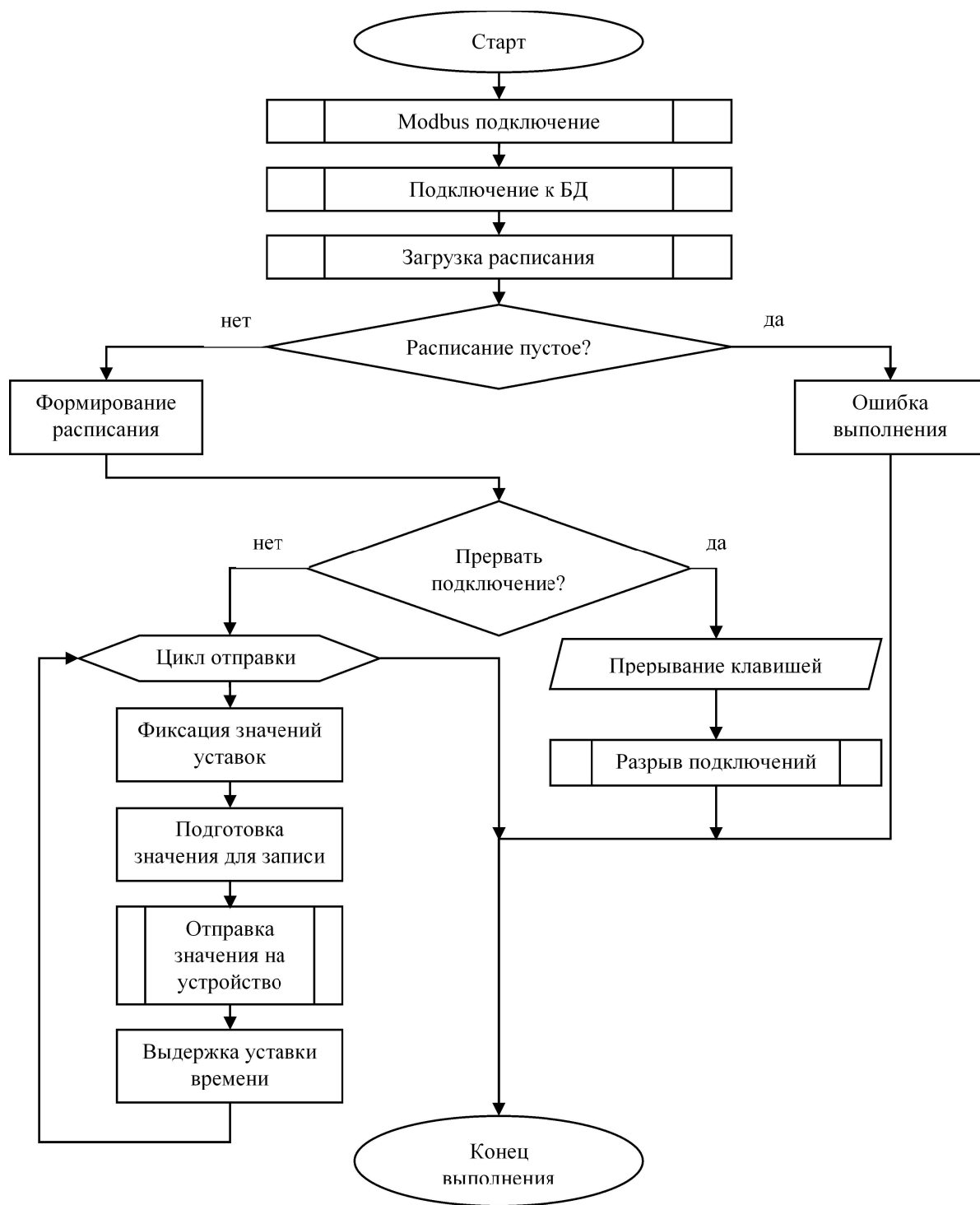


Рисунок 4.3 – Блок-схема программного компонента управления имитаторов нагрузки

7) Сведения об исполняемом пакете.

Программный пакет подсистемы мониторинга и управления содержит четыре основных программных кода (см. приложение Г):

а) `main_active_load.py` – компонент мониторинга модуля имитации активной нагрузки,

б) `main_experiment_active_load.py` – компонент управления модулем имитации активной нагрузки для проведения испытаний по заранее заданному расписанию,

в) `main_reactive_load.py` – компонент мониторинга модуля имитации реактивной нагрузки,

г) `main_experiment_reactive_load.py` – компонент управления модулем имитации реактивной нагрузки для проведения испытаний по заранее заданному расписанию.

Также пакет содержит дополнительные компоненты:

- `load_connect.py` – компонент-коннектор для имитаторов нагрузки,
- `connection_db.py` – компонент-коннектор для подключения к сетевой БД,
- `utils.py` – унифицированная библиотека, содержащая функции кодирования и декодирования регистров данных, а также средства обработки ошибочных данных,
- `create_file_and_path.py` – компонент для работы с файловыми системами.

Подробное описание вспомогательных компонентов приведено в пункте 4.3.6.

4.3.3 Подсистема мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции

Подсистема мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции:

1) Общие сведения.

Подсистема имитации и мониторинга фотоэлектрических модулей (далее – «Emulator script») предназначена для удаленного управления двумя аппаратными имитаторами ФЭМ, считывания их электрических параметров и регистрации результатов в базе данных с параллельной публикацией через брокера MQTT.

Каждый имитатор представляет собой программируемый источник постоянного тока/напряжения, работающий по SCPI-подобному протоколу поверх TCP. Программный компонент «Emulator script» подключается к имитаторам по сети, конфигурирует их под выбранную модель солнечного модуля и текущие метеоусловия, а затем в непрерывном режиме снимает телеметрию (напряжение, ток, мощность), рассчитывает суммарные показатели и записывает их в таблицу `PV_DC_telemetry` базы данных.

В составе подсистемы реализованы следующие функции:

- установка паспортных параметров ФЭМ (V_{OC} , I_{SC} , V_{MP} , I_{MP} , температурные коэффициенты и условия STC) на уровне имитаторов по данным таблицы `PV_module_source`,

- задание текущих условий освещенности и температуры (GPV, TPV) по данным из таблицы `weather_current`,
- считывание мгновенных значений напряжения и тока с каждого имитатора и вычисление мощности,
- публикация телеметрии каждого имитатора и агрегированных величин в MQTT-топики для дальнейшей визуализации и использования управляющими алгоритмами;

2) Схема подключения.

Имитаторы ФЭМ 1 и 2 подключены к локальной вычислительной сети через Ethernet (см. рисунок 4.4). Сервер с установленным программным компонентом «Emulator script» подключается к этой же сети. «Emulator script» устанавливает TCP-соединения с обоими имитаторами, задает им параметры имитации и циклически считывает их электрические параметры. Полученные значения суммируются и сохраняются в таблицу базы данных `PV_DC_telemetry`.

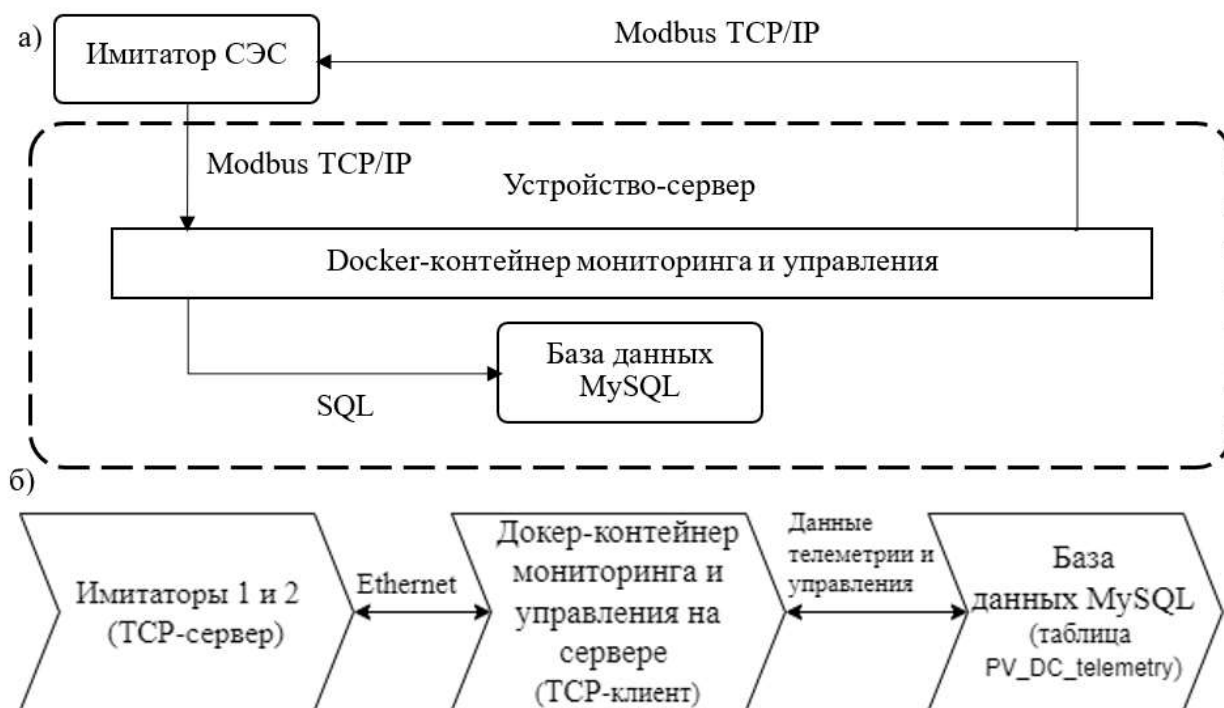


Рисунок 4.4 – Логическая схема подсистемы мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции (а) и схема последовательности взаимодействия элементов подсистемы мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции (б)

В данной схеме имитаторы выступают в качестве Modbus-серверов, к которым обращается программный компонент, реализованный в изолированном контейнере на общем сервере;

3) Адресация и измеряемые величины.

Каждый измеряемый параметр имитатора соответствует определенной SCPI-команде (ASCII-строке), отправляемой по TCP-соединению. Имитатор возвращает ответ также в виде ASCII-строки с числовым значением. В программном компоненте значения извлекаются из ответа и приводятся к числовому типу, после чего используется расчет мощности и запись результатов в БД.

Формат описания:

- команда – SCPI-идентификатор (строка), отправляемый в TCP-сессию имитатора,
- ответ – формат возвращаемого значения (как правило, одно число в ASCII-виде),
- тип – тип данных после преобразования в программе (float),
- масштаб – коэффициент пересчета к инженерным единицам (обычно 1),
- единица – единица измерения.

Параметры, считываемых подсистемой представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Параметры, считываемые с подсистемы мониторинга

Наименование параметра	Команда (SCPI)	Ответ	Тип	Масштаб	Единица
Напряжение имитатора 1	MEAS:VOL?	Число (ASCII)	float	1	В
Ток имитатора 1	MEAS:CUR?	Число (ASCII)	float	1	А
Мощность имитатора 1	$P1 = U1 \cdot I1$	Расчет в ПО	float	1	Вт
Напряжение имитатора 2	MEAS:VOL?	Число (ASCII)	float	1	В
Ток имитатора 2	MEAS:CUR?	Число (ASCII)	float	1	А
Мощность имитатора 2	$P2 = U2 \cdot I2$	Расчет в ПО	float	1	Вт
Суммарная мощность	$P_total = P1 + P2$	Расчет в ПО	float	1	Вт
Суммарный ток	$I_total = I1 + I2$	Расчет в ПО	float	1	А
Напряжение шины	$U_total = U1^*$	Выбор в ПО	float	1	В

Для команд управления (записи) используется аналогичный принцип, однако вместо «ответа» задается передаваемое значение (аргумент команды). Формат описания команд записи:

- адрес – SCPI-команда,
- аргумент – передаваемое значение (если команда на запись) / «–» (если чтение),
- тип – тип данных,

- масштаб – коэффициент пересчета,
- единица – единица измерения.

Параметры, считываемых подсистемой представлены в таблице 4.14;

Таблица 4.14 – Задаваемые параметры и управляющие команды подсистемы управления

Назначение	Команда (SCPI)	Передаваемое значение	Тип	Масштаб	Единица
Включение/ отключение выхода имитатора	OUTPUT, <x>	0 – выкл.; 1 – вкл.	int	1	-
Установка текущей температуры ФЭМ	SYST:INT:SIM:SET TPV,<T>	T	float	1	°C
Установка текущей освещенности	SYST:INT:SIM:SET GPV,<G>	G	float	1	Вт/м²
Установка V_{OC} при STC	SYST:INT:SIM:SET VOC_STC,<Voc>	V_{OC}	float	1	В
Установка I_{SC} при STC	SYST:INT:SIM:SET ISC_STC,<Isc>	I_{SC}	float	1	А
Установка V_{MPP} при STC	SYST:INT:SIM:SET VMPP_STC,<Vmpp >	V_{MPP}	float	1	В
Установка I_{MPP} при STC	SYST:INT:SIM:SET IMPP_STC,<Impp>	I_{MPP}	float	1	А
Температурный коэффициент тока (α)	SYST:INT:SIM:SET ALPHA,< α >	α	float	1	1/°C*
Температурный коэффициент (β/γ – в модели прибора)	SYST:INT:SIM:SET BETA,< β >	β	float	1	1/°C*
Температура STC	SYST:INT:SIM:SET TSTC,<Tstc>	T_{STC}	float	1	°C
Освещенность STC	SYST:INT:SIM:SET GSTC,<Gstc>	G_{STC}	float	1	Вт/м²
Переключение источника управления (служебно)	... set_prog_source_v("eth"/"slot4")	Режим	-	-	-
Переключение источника управления (служебно)	... set_prog_source_i("eth"/"slot4")	Режим	-	-	-

4) Структура базы данных.

Для хранения телеметрических данных подсистемы мониторинга и управления имитаторами используется реляционная база данных MySQL. Данный тип БД выбран

благодаря табличной модели, поддержке целостности данных и удобству выполнения аналитических SQL-запросов.

Паспортные параметры фотоэлектрического модуля (V_{OC} , I_{SC} , V_{MPP} , I_{MPP} , температурные коэффициенты и условия STC) хранятся в таблице PV_module_source (см. таблицу 4.15). При запуске подсистемы выполняется чтение этих данных из БД, после чего они используются для первичной настройки имитаторов путем отправки SCPI-команд вида: SYST:INT:SIM:SET VOC_STC,<...>, ... ISC_STC,<...>, ... VMPP_STC,<...>, ... IMPP_STC,<...> и др.

Таблица 4.15 – Структура таблицы PV_module_source

Наименование поля	Тип данных	Состояние	Единица	Наименование параметра
id	bigint	Авто	-	Идентификатор записи
voc_stc	float	Чтение	В	Напряжение холостого хода при STC (V_{OC})
isc_stc	float	Чтение	А	Ток короткого замыкания при STC (I_{SC})
vmpp_stc	float	Чтение	В	Напряжение в точке MPP при STC (V_{MPP})
impp_stc	float	Чтение	А	Ток в точке MPP при STC (I_{MPP})
alpha	float	Чтение	1/°C*	Температурный коэффициент тока (α)
beta	float	Чтение	1/°C*	Температурный коэффициент напряжения/мощности (β)
tstc	float	Чтение	°C	Температура STC (T_{STC})
gstc	float	Чтение	Вт/м²	Освещенность STC (G_{STC})

Все параметры, считанные с каждого имитатора по TCP (SCPI-команды MEAS:VOL?, MEAS:CUR?), а также рассчитанные мощности и агрегированные значения записываются в таблицу PV_DC_telemetry (см. таблицу 4.16).

Формат описания полей таблицы PV_module_source:

а) тип данных – формат хранения значения в БД (для всех измеряемых и расчетных параметров используется float),

б) состояние – режим доступа к полю БД:

- авто – автоматически формируется (для id),
- чтение (параметры, приходящие с имитаторов),
- запись (параметры, передаваемые имитаторам),
- вычисление (значения, рассчитываемые программно по измеренным данным),

в) единица – единица измерения параметра;

Таблица 4.16 – Структура таблицы PV_DC_telemetry

Наименование поля	Тип данных	Состояние	Единица	Наименование параметра
power_emulator_1	float	Вычисление	Вт	Мощность имитатора 1 ($P_1 = U_1 * I_1$)
voltage_emulator_1	float	Чтение	В	Напряжение имитатора 1
current_emulator_1	float	Чтение	А	Ток имитатора 1
power_emulator_2	float	Вычисление	Вт	Мощность имитатора 2 ($P_2 = U_2 * I_2$)
voltage_emulator_2	float	Чтение	В	Напряжение имитатора 2
current_emulator_2	float	Чтение	А	Ток имитатора 2
power_total	float	Вычисление	Вт	Суммарная мощность ($P_1 + P_2$)
voltage_total	float	Вычисление	В	Напряжение шины (в текущей реализации принимается равным U_1)
current_total	float	Вычисление	А	Суммарный ток ($I_1 + I_2$)

5) Компонент мониторинга и управления.

Программный код мониторинга и управления имитаторами предназначен для организации непрерывного обмена данными между двумя имитаторами фотоэлектрических модулей и реляционной базой данных MySQL, а также для выполнения базового контура управления режимами имитации по данным из БД.

Программный компонент выполняет следующие задачи:

- установление TCP-соединения с каждым имитатором по Ethernet,
- считывание первичной конфигурации модели фотоэлектрического модуля по данным таблицы PV_module_source (передача параметров STC и температурных коэффициентов в имитаторы командами SYST:INT:SIM:SET ...),
- периодическое считывание электрических параметров каждого имитатора по SCPI-командам MEAS:VOL? и MEAS:CUR?,
- преобразование ответов имитаторов в числовые значения, расчет мощности каждого имитатора и агрегированных показателей (суммарный ток и суммарная мощность),
- запись актуальных значений телеметрии в таблицу PV_DC_telemetry базы данных (обновление текущего состояния через SQL-запрос UPDATE),

- считывание текущих условий имитации из таблицы `weather_current` и передача их в имитаторы (параметры TPV и GPV) для моделирования работы ФЭМ при заданной температуре и освещенности,

- контроль разрешения работы подсистемы и всего комплекса по управляющим флагам (таблица `control_scripts_signal`), включая отключение выходов имитаторов и корректное завершение работы при запрете/аварийном сигнале.

Для работы программного компонента мониторинга и управления имитаторами используются следующие входные параметры и исходные данные:

- IP-адрес имитатора 1,
- IP-адрес имитатора 2,
- TCP-порт подключения к имитаторам,
- параметры TCP-соединения – считываются из файла `setting.ini` (время ожидания TIMEOUT, размер буфера BUFFER_SIZE, а также секции EM_ONE и EM_TWO с адресами устройств),

- параметры подключения к БД MySQL – считываются из файла `setting.ini` (хост, порт, имя базы данных, пользователь, пароль),

- исходные параметры модели ФЭМ – считываются из таблицы `PV_module_source` (`Voc_STC`, `Isc_STC`, `Vmpp_STC`, `Impp_STC`, α , β , `TSTC`, `GSTC`) и используются для первичной настройки обоих имитаторов,

- текущие условия имитации – считываются из таблицы `weather_current` (параметры TPV, GPV) и периодически передаются в имитаторы в процессе работы,

- управляющие сигналы разрешения работы – считываются из таблицы `control_scripts_signal`, на основании которых выполняется включение/отключение выходов имитаторов и завершение работы скрипта.

Результатом работы программного компонента является словарь параметров телеметрии, где ключ – это имя параметра (например, `voltage_emulator_1`), а значение – числовая величина в инженерных единицах, полученная из ответов имитаторов и/или рассчитанная программно (мощности и суммарные показатели), и запись в таблице `PV_DC_telemetry` – каждая итерация опроса обновляет текущие значения телеметрии в базе данных с использованием SQL-запроса UPDATE, фиксируя актуальные параметры каждого имитатора и агрегированные величины (суммарный ток и суммарную мощность). Блок-схема реализованного программного компонента мониторинга системы имитации нагрузки представлена на рисунке 4.5.

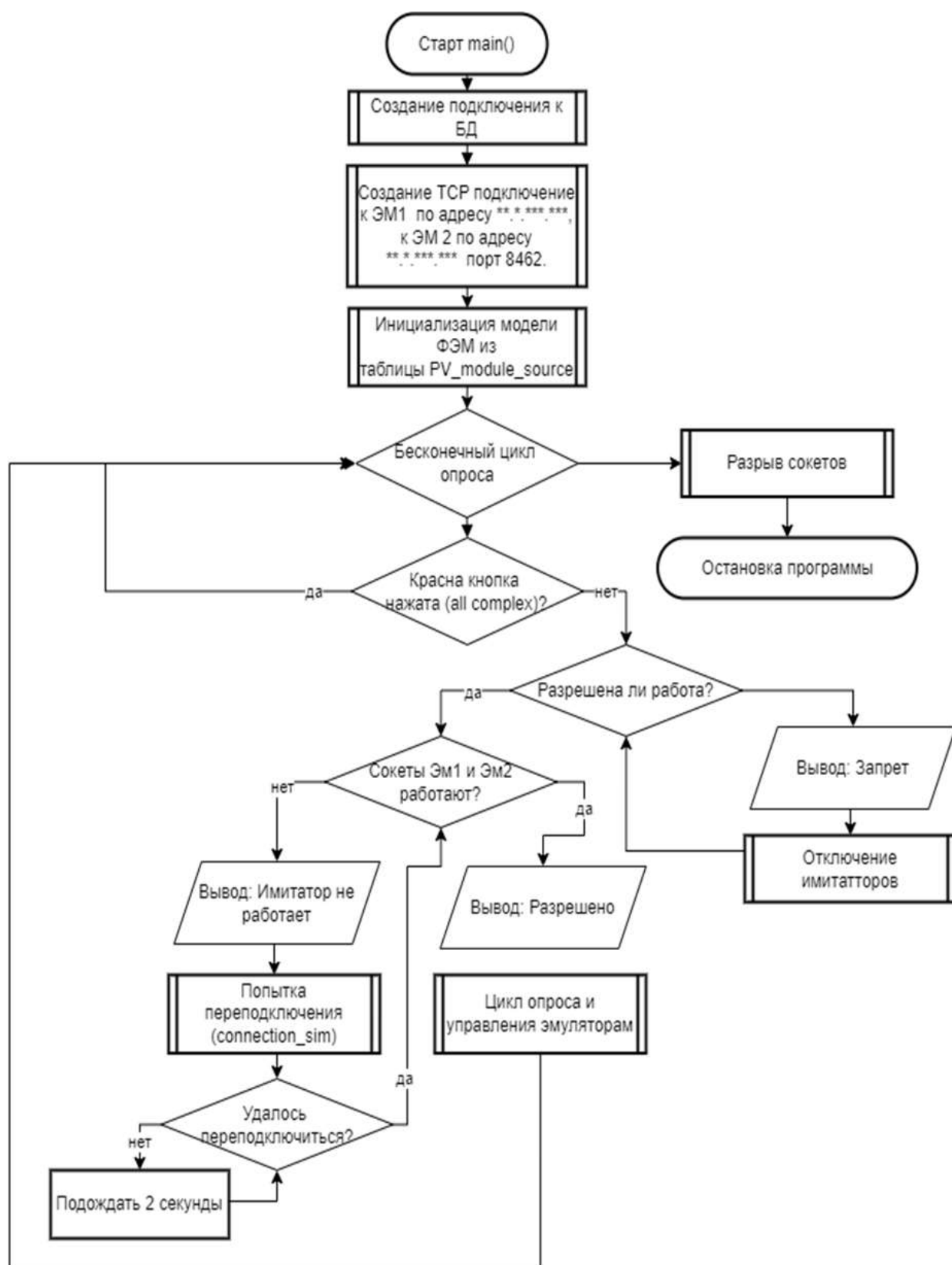


Рисунок 4.5 – Блок-схема программы `main_emulator`

Работа алгоритма представляет собой следующую последовательность действий:

- На этапе инициализации формируется подключение к базе данных MySQL, устанавливаются TCP-соединения с имитаторами ЭМ1 и ЭМ2, после чего выполняется инициализация модели ФЭМ на основе параметров из таблицы PV_module_source (передача паспортных данных STC в оба имитатора);

- Далее запускается бесконечный цикл работы программы. В начале каждой итерации выполняется проверка сигнала аварийной остановки («красная кнопка»), соответствующего флагу all_complex;

- Если работа комплекса запрещена (all_complex = 0), выполняется корректное завершение: производится отключение выходов имитаторов, разрыв TCP-соединений (заккрытие сокетов) и остановка программы;

- Если аварийный останов не активирован (all_complex = 1), программа переходит к проверке разрешения работы подсистемы имитаторов (флаг emulators). При запрете работы формируется сообщение «Запрет» и выполняется отключение имитаторов (перевод в режим нулевой генерации путем установки GPV = 0), после чего цикл продолжается;

- При разрешенной работе подсистемы выполняется проверка состояния TCP-соединений с ЭМ1 и ЭМ2. если хотя бы один имитатор недоступен, выводится сообщение о неисправности, выполняется попытка переподключения (connection_sim). При неуспешном переподключении выполняется задержка 2 секунды и повтор попытки осуществляется в следующей итерации цикла;

- При наличии активных соединений выполняется основной блок «Цикл опроса и управления имитаторами», включающий: считывание напряжения и тока с каждого имитатора, расчет мощностей и суммарных величин, обновление таблицы PV_DC_telemetry, а также выполнение команд управления режимом имитации в зависимости от разрешающих сигналов по каждому устройству (emulator_1, emulator_2);

- По завершении очередной итерации алгоритм возвращается к началу цикла для повторной проверки разрешающих сигналов и обновления телеметрии;

6) Сведения об исполняемом пакете.

Программный пакет компонента управления и опроса фотоэлектрических эмуляторов содержит два основных кода (см. приложения Г):

- main_emulator.py – головной модуль, реализующий запуск соединений, первичную параметризацию двух эмуляторов по данным из таблицы PV_module_source и основной цикл работы (разрешение/запрет управления, обработка «красной кнопки», отключение выходов, повторное подключение при потере связи);

– `main_em_telemetry.py` – модуль телеметрии, реализующий периодический опрос двух эмуляторов (измерение U , I , расчет P) и запись результатов в базу данных (таблица `PV_DC_telemetry`) через интерфейс оператора БД.

Также пакет содержит дополнительные компоненты:

- `emulators_connect.py` – компонент-коннектор для имитаторов,
- `connection_db.py` – компонент-коннектор для подключения к сетевой БД,
- `emulators_command.py` – библиотека функций для имитаторов солнечной электростанции,
- `emulators_callback.py` – библиотека функций для обработки управляющих воздействий,
- `command_operator.py` – модуль «оператора» базы данных,
- `create_file_and_path.py` – компонент для работы с файловыми системами.

Подробное описание вспомогательных компонентов приведено в пункте 4.3.6.

4.3.4 Подсистема мониторинга батарейных инверторов

Подсистема мониторинга батарейных инверторов:

1) Общие сведения.

Подсистема мониторинга инверторно-аккумуляторной системы на базе трех однофазных инверторов Victron Quattro 48/10000/140-100/100 предназначена для удаленного получения эксплуатационных параметров трехфазной энергетической системы, включающей внешние источники питания (промышленную сеть и дизель-генераторы 12 и 30 кВт), общее DC-звено на основе аккумуляторных батарей и параллельно подключенных суперконденсаторов, а также трехфазный инверторный комплекс, формирующий внутреннюю сеть контейнера и питающий его нагрузку. Обмен данными осуществляется через встроенный контроллер Victron GX по протоколу MQTT, где инверторная система выступает в роли MQTT-издателя, а программный компонент «Подсистема мониторинга Victron» (далее – «Victron script») – в роли MQTT-клиента, принимающего и обрабатывающего телеметрию для последующей записи в базу данных.

Целями подсистемы мониторинга являются:

- считывание в реальном времени основных электрических параметров трех фаз внешней сети/ДГУ и внутренней сети контейнера испытательного стенда, а также параметров DC-звена (напряжение, ток, мощность, состояние заряда ESS),
- преобразование JSON-сообщений MQTT в инженерные величины,
- сохранение результатов в таблицу базы данных `victron_telemetry` для последующего анализа, визуализации и использования в управляющих алгоритмах;

2) Схема подключения.

Инверторно-аккумуляторный комплекс Victron Quattro подключен к локальной вычислительной сети контейнера через Ethernet (см. рисунок 4.6). На этом же сегменте сети размещен MQTT-брокер, к которому подключается сервер с установленным «Victron script». Контроллер Victron GX публикует телеметрические сообщения в MQTT-брокер, а «Victron script» подписывается на целевые топики, принимает данные и передает их в таблицу базы данных victron_telemetry.

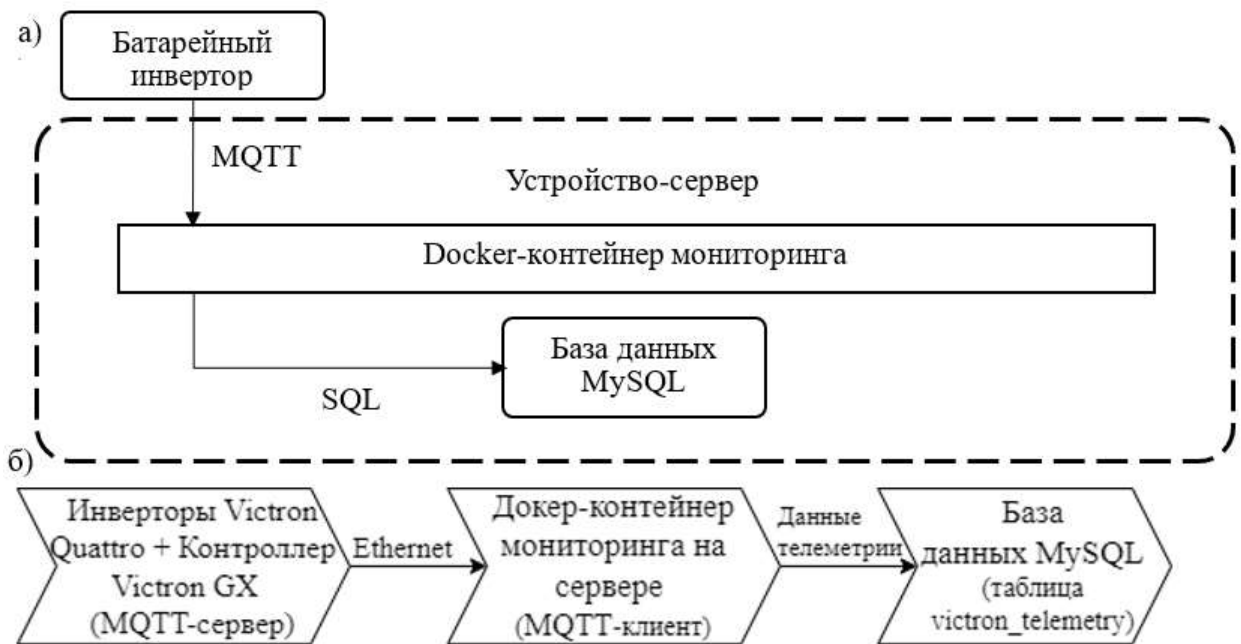


Рисунок 4.6 – Логическая схема подсистемы мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции (а) и последовательная схема взаимодействия элементов подсистемы мониторинга и управления имитаторами солнечной электростанции (б)

В данной схеме батарейные инверторы выступают в качестве MQTT-серверов, к которым обращается программный компонент, реализованный в изолированном контейнере на общем сервере;

3) Адресация и измеряемые величины.

Каждый измеряемый параметр соответствует определенному MQTT-топику, указанному в конфигурационном файле data_topics_victron.json.

Формат описания:

- идентификатор – логический ключ параметра в словаре dict_msg,
- топик – MQTT-канал, из которого считывается значение,
- тип – формат интерпретации данных (для всех параметров – float),

– единица – инженерная единица измерения.

Параметры, считываемых подсистемой представлены в таблице 4.17;

Таблица 4.17 – Параметры, считываемые с подсистемы мониторинга

Наименование параметра	Идентификатор (ключ)	Тип	Единица
Напряжение фазы L1 на стороне нагрузки	voltage_L1_consumption	float	В
Напряжение фазы L2 на стороне нагрузки	voltage_L2_consumption	float	В
Напряжение фазы L3 на стороне нагрузки	voltage_L3_consumption	float	В
Активная мощность фазы L1 на стороне нагрузки	power_L1_consumption	float	Вт
Активная мощность фазы L2 на стороне нагрузки	power_L2_consumption	float	Вт
Активная мощность фазы L3 на стороне нагрузки	power_L3_consumption	float	Вт
Ток фазы L1 на стороне нагрузки	current_L1_consumption	float	А
Ток фазы L2 на стороне нагрузки	current_L2_consumption	float	А
Ток фазы L3 на стороне нагрузки	current_L3_consumption	float	А
Частота по фазе L1 на стороне нагрузки	frequency_L1_consumption	float	Гц
Частота по фазе L2 на стороне нагрузки	frequency_L2_consumption	float	Гц
Частота по фазе L3 на стороне нагрузки	frequency_L3_consumption	float	Гц
Ток аккумуляторной батареи / ESS	current_ESS	float	А
Мощность DC-звена ESS (заряд/разряд)	power_ESS	float	Вт
Напряжение DC-звена ESS	voltage_ESS	float	В
Состояние заряда ESS	SOC_ESS	float	%
Активная мощность фазы L1 внешней сети/ДГУ	power_L1_grid	float	Вт
Активная мощность фазы L2 внешней сети/ДГУ	power_L2_grid	float	Вт
Активная мощность фазы L3 внешней сети/ДГУ	power_L3_grid	float	Вт
Напряжение фазы L1 внешней сети/ДГУ	voltage_L1_grid	float	В
Напряжение фазы L2 внешней сети/ДГУ	voltage_L2_grid	float	В
Напряжение фазы L3 внешней сети/ДГУ	voltage_L3_grid	float	В
Ток фазы L1 внешней сети/ДГУ	current_L1_grid	float	А

4) Структура базы данных.

Для хранения телеметрических данных подсистемы мониторинга инверторно-аккумуляторной системы Victron используется реляционная база данных MySQL. Данный тип БД выбран благодаря табличной модели, поддержке целостности данных и удобству выполнения аналитических SQL-запросов. Все параметры, считываемые подсистемой мониторинга Victron по протоколу MQTT, после обработки записываются в таблицу victron_telemetry (см. таблицу 4.18).

Формат описания полей таблицы:

а) тип данных – формат хранения значения в БД (для всех измеряемых параметров используется float),

б) состояние – режим доступа к полю БД:

– чтение (параметры, поступающие от системы Victron),

– запись (параметры, передаваемые инвертору),

в) единица – единица измерения параметра;

Таблица 4.18 – Структура таблицы sma_telemetry

Наименование поля	Тип данных	Состояние	Единица	Наименование параметра
voltage_L1_consumption	float	Чтение	В	Напряжение фазы L1 на стороне нагрузки
voltage_L2_consumption	float	Чтение	В	Напряжение фазы L2 на стороне нагрузки
voltage_L3_consumption	float	Чтение	В	Напряжение фазы L3 на стороне нагрузки
power_L1_consumption	float	Чтение	Вт	Активная мощность фазы L1 на стороне нагрузки
power_L2_consumption	float	Чтение	Вт	Активная мощность фазы L2 на стороне нагрузки
power_L3_consumption	float	Чтение	Вт	Активная мощность фазы L3 на стороне нагрузки
current_L1_consumption	float	Чтение	А	Ток фазы L1 на стороне нагрузки
current_L2_consumption	float	Чтение	А	Ток фазы L2 на стороне нагрузки
current_L3_consumption	float	Чтение	А	Ток фазы L3 на стороне нагрузки
frequency_L1_consumption	float	Чтение	Гц	Частота по фазе L1 на стороне нагрузки
frequency_L2_consumption	float	Чтение	Гц	Частота по фазе L2 на стороне нагрузки
frequency_L3_consumption	float	Чтение	Гц	Частота по фазе L3 на стороне нагрузки
current_ESS	float	Чтение	А	Ток аккумуляторной батареи / DC-звена ESS
power_ESS	float	Чтение	Вт	Мощность ESS (заряд/разряд)
voltage_ESS	float	Чтение	В	Напряжение DC-звена ESS
SOC_ESS	float	Чтение	%	Состояние заряда ESS

Продолжение таблицы 4.18

Наименование поля	Тип данных	Состояние	Единица	Наименование параметра
power_L1_grid	float	Чтение	Вт	Активная мощность фазы L1 внешней сети/ДГУ
power_L2_grid	float	Чтение	Вт	Активная мощность фазы L2 внешней сети/ДГУ
power_L3_grid	float	Чтение	Вт	Активная мощность фазы L3 внешней сети/ДГУ
voltage_L1_grid	float	Чтение	В	Напряжение фазы L1 внешней сети/ДГУ
voltage_L2_grid	float	Чтение	В	Напряжение фазы L2 внешней сети/ДГУ
voltage_L3_grid	float	Чтение	В	Напряжение фазы L3 внешней сети/ДГУ
current_L1_grid	float	Чтение	А	Ток фазы L1 внешней сети/ДГУ
current_L2_grid	float	Чтение	А	Ток фазы L2 внешней сети/ДГУ
current_L3_grid	float	Чтение	А	Ток фазы L3 внешней сети/ДГУ

5) Компонент мониторинга.

Скрипт мониторинга предназначен для организации непрерывного обмена данными между инверторно-аккумуляторной системой Victron Quattro и реляционной базой данных MySQL.

Программный компонент выполняет следующие задачи:

- установление соединения с MQTT-брокером и поддержание сеанса обмена сообщениями,
- подписка на заданный набор MQTT-топиков и прием телеметрических данных от системы Victron согласно карте топиков, заданной в файле data_topics_victron.json,
- периодическая передача служебных keepalive-сообщений (сообщений для поддержания связи с устройством) на устройство Victron для инициирования обновления телеметрии,
- преобразование JSON-сообщений MQTT в инженерные величины (напряжения, токи, мощности, частоты, состояние заряда ESS) и обновление соответствующих элементов словаря параметров,

- запись обработанных данных в таблицу `victron_telemetry` базы данных MySQL в цикле опроса.

Для работы используются следующие входные данные:

- IP-адрес инвертора MQTT-брокера инвертора;
- TCP-порт MQTT;
- интервал поддержания соединения MQTT (`keepalive`) – 60 с;
- учетные данные для доступа к MQTT-брокеру – имя пользователя и пароль, задаваемые в конфигурационном файле `setting.ini`;
- идентификатор устройства Victron, используемый в структуре MQTT топиков (строка вида `d436391ea13a`, входящая в пути `R/.../keepalive/` и `N/.../...`);
- карта MQTT-топиков – загружается из конфигурационного файла `data_topics_victron.json` (соответствие между именами параметров и топиками);
- параметры подключения к базе данных MySQL – считываются из файла `setting.ini` (хост, порт, имя базы данных, пользователь, пароль).

Результатом работы программного компонента является словарь параметров, где ключ – это имя параметра (например, `voltage_L1_consumption`, `power_ESS`), а значение – числовое значение, полученное из соответствующего MQTT-топика и приведенное к инженерным единицам, и запись в таблице `victron_telemetry` – каждая итерация основного цикла обновляет строку в базе данных, фиксируя актуальные параметры инверторно-аккумуляторной системы Victron.

На рисунке 4.7 представлена блок-схема, отражающая алгоритм работы головной программы `main_victron`, входящей в программный компонент Victron script, и вспомогательной подпрограммы `delay(victron)`.

Работа алгоритма представляет собой следующую последовательность действий:

- На этапе инициализации устанавливается соединение с MQTT-брокером (по задаваемым IP и порту), и создается подключение к базе данных MySQL;
- Далее выполняется подготовка объектов подсистемы Victron и загрузка настроек: создаются объекты классов `Command` и `VictronCommand`, загружается конфигурация топиков из файла `data_topics_victron.json`;
- После инициализации запускается асинхронная задача опроса данных `delay(victron)`, выполняемая в отдельном цикле, и основной модуль переходит к регулярному обновлению параметров в базе данных;

- В основном цикле программы проверяется состояние задачи опроса. Пока задача не завершена, выполняется обновление параметров Victron в таблице `victron_telemetry` (вызов `update_param_victron`) и выдерживается пауза 1 секунда;
- Подпрограмма `delay(victron)` реализует бесконечный цикл опроса: вызывается метод `victron.survey_victron` для приема телеметрии от системы Victron, затем выполняется задержка 0,15 секунды, после чего цикл повторяется;
- При отмене или завершении задачи опроса Victron происходит выход из основного цикла, формируется сообщение о снятии задачи и выполняется корректная остановка программы с закрытием всех соединений;

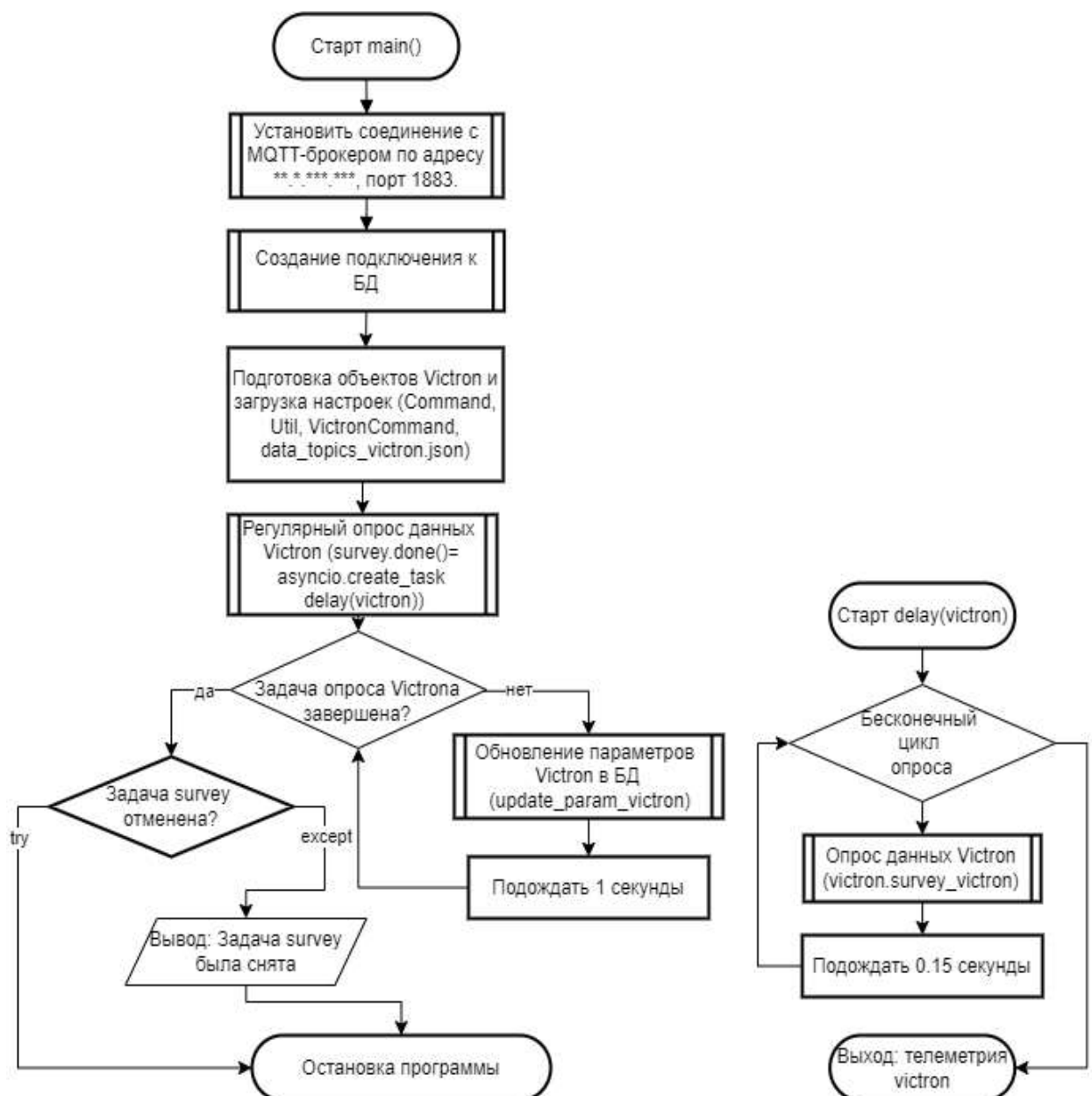


Рисунок 4.7 – Блок-схема программы `main_victron` и подпрограммы `delay(victron)`

б) Сведения об исполняемом пакете.

Программный пакет компонента Victron script содержит один основной код – main_victron.py.

main_victron.py – основной модуль подсистемы мониторинга, реализующий непрерывный цикл обмена с системой Victron и запись данных в базу. В модуле выполняются: чтение настроек из конфигурационных файлов, установление соединения с MQTT-брокером и базой данных, создание объектов классов VictronCommand и Command, запуск асинхронной задачи опроса delay(victron) и организация верхнеуровневой логики работы скрипта (запуск, обработка ошибок, корректное завершение программы) (приложение Г).

Также пакет содержит дополнительные компоненты:

- victron_contact.py – компонент-коннектор для батарейного инвертора,
- contact_mqtt.py – компонент-коннектор для обеспечения MQTT взаимодействия,
- connection_db.py – компонент-коннектор для подключения к сетевой БД,
- publish.py – библиотека функций для публикации по MQTT,
- create_file_and_path.py – компонент для работы с файловыми системами.

Подробное описание вспомогательных компонентов приведено в пункте 4.3.6.

4.3.5 Подсистема мониторинга солнечного инвертора

Подсистема мониторинга солнечного инвертора:

1) Общие сведения.

Подсистема мониторинга солнечного инвертора SMA Sunny Tripower 12000TL предназначена для удаленного опроса по протоколу Modbus TCP/IP и регистрации его эксплуатационных параметров в базе данных. Инвертор выступает в роли Modbus-сервера, а программный компонент «Подсистема мониторинга солнечного инвертора» (далее «SMA script») – в роли Modbus-клиента.

Целями подсистемы мониторинга являются:

- считывание в реальном времени основных электрических параметров (токи, напряжения, мощности, частота сети),
- преобразование шестнадцатеричных данных Modbus-регистров в читаемые величины,
- сохранение результатов в базу данных для последующего анализа, визуализации и использования в управляющих алгоритмах;

2) Схема подключения.

Инвертор SMA Sunny Tripower подключен к локальной вычислительной сети через Ethernet (см. рисунок 4.8). Сервер с установленным «SMA script» подключается к этой же сети. «SMA script» устанавливает TCP-соединение с инвертором и циклически опрашивает его регистры. Полученные значения сохраняются в таблицу базы данных sma_telemetry.

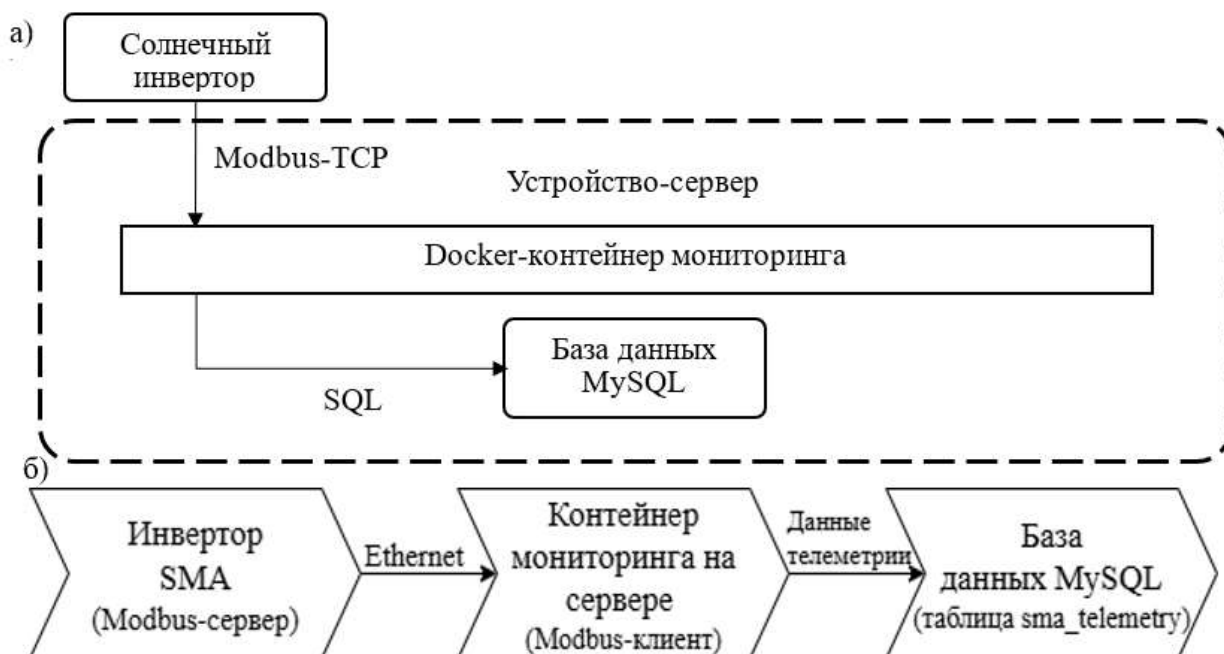


Рисунок 4.8 – Логическая схема подсистемы мониторинга солнечного инвертора (а) и последовательная схема взаимодействия элементов подсистемы мониторинга солнечного инвертора (б)

В данной схеме батарейные инверторы выступают в качестве MQTT-серверов, к которым обращается программный компонент, реализованный в изолированном контейнере на общем сервере;

3) Адресация и измеряемые величины.

Каждый измеряемый параметр соответствует определенному адресу в карте Modbus-регистров инвертора.

Формат описания:

- адрес – начальный Modbus-регистр (десятичный номер),
- регистры – число регистров, используемых для хранения величины,
- тип – метод интерпретации значения (s32 – знаковое целое 32 бита, u32 – беззнаковое целое 32 бита),
- масштаб – коэффициент масштабирования (порядок деления на 10^n для получения инженерного значения),

– единица – единица измерения.

Параметры, считываемых подсистемой представлены в таблице 4.19;

Таблица 4.19 – Параметры, считываемые с подсистемы мониторинга

Наименование параметра	Адрес	Регистры	Тип	Масштаб	Единица
Ток по входу DC1	30769	2	s32	10^{-3}	А
Напряжение по входу DC1	30771	2	s32	10^{-2}	В
Мощность по входу DC1	30773	2	s32	1	Вт
Ток по входу DC2	30957	2	s32	10^{-3}	А
Напряжение по входу DC2	30959	2	s32	10^{-2}	В
Мощность по входу DC2	30961	2	s32	1	Вт
Напряжение сети L1	30783	2	u32	10^{-2}	В
Напряжение сети L2	30785	2	u32	10^{-2}	В
Напряжение сети L3	30787	2	u32	10^{-2}	В
Ток сети	30795	2	u32	10^{-3}	А
Частота сети	30803	2	u32	10^{-2}	Гц
Активная мощность	30775	2	s32	1	Вт
Полная мощность	30813	2	s32	1	ВА
Реактивная мощность	30805	2	s32	1	Вар
Активная мощность L1	30777	2	s32	1	Вт
Активная мощность L2	30779	2	s32	1	Вт
Активная мощность L3	30781	2	s32	1	Вт
Реактивная мощность L1	30807	2	s32	1	Вар
Реактивная мощность L2	30809	2	s32	1	Вар
Реактивная мощность L3	30811	2	s32	1	Вар
Полная мощность L1	30815	2	s32	1	ВА
Полная мощность L2	30817	2	s32	1	ВА
Полная мощность L3	30819	2	s32	1	ВА

4) Структура базы данных.

Для хранения телеметрических данных подсистемы мониторинга солнечного инвертора используется реляционная база данных MySQL. Данный тип БД выбран благодаря табличной модели, поддержке целостности данных и удобству выполнения аналитических SQL-запросов. Все параметры, считанные подсистемой мониторинга солнечного инвертора по протоколу Modbus TCP/IP, после обработки записываются в таблицу sma_telemetry (см. таблицу 4.20).

Формат описания полей таблицы:

а) тип данных – формат хранения значения в БД (для всех измеряемых параметров используется float, для идентификатора – bigint, для временной метки – timestamp),

б) состояние – режим доступа к полю БД:

– авто – автоматически формируется (для id и ts),

- чтение (параметры, приходящие от инвертора),
- запись (параметры, передаваемые инвертору),
- в) единица – единица измерения параметра;

Таблица 4.20 – Структура таблицы sma_telemetry

Наименование поля	Тип данных	Состояние	Единица	Наименование параметра
id	bigint	Авто	-	Идентификатор
ts	timestamp	Авто	-	Время получения параметров
dc_current_input_1	float	Чтение	А	Ток по входу DC1
dc_voltage_input_1	float	Чтение	В	Напряжение по входу DC1
dc_power_input_1	float	Чтение	Вт	Мощность по входу DC1
dc_current_input_2	float	Чтение	А	Ток по входу DC2
dc_voltage_input_2	float	Чтение	В	Напряжение по входу DC2
dc_power_input_2	float	Чтение	Вт	Мощность по входу DC2
grid_voltage_phase_1	float	Чтение	В	Напряжение сети L1
grid_voltage_phase_2	float	Чтение	В	Напряжение сети L2
grid_voltage_phase_3	float	Чтение	В	Напряжение сети L3
grid_current	float	Чтение	А	Ток сети
grid_frequency	float	Чтение	Гц	Частота сети
active_power	float	Чтение	Вт	Активная мощность
apparent_power	float	Чтение	ВА	Полная мощность
reactive_power	float	Чтение	Вар	Реактивная мощность
active_power_l1	float	Чтение	Вт	Активная мощность L1
active_power_l2	float	Чтение	Вт	Активная мощность L2
active_power_l3	float	Чтение	Вт	Активная мощность L3
reactive_power_l1	float	Чтение	Вар	Реактивная мощность L1
reactive_power_l2	float	Чтение	Вар	Реактивная мощность L2
reactive_power_l3	float	Чтение	Вар	Реактивная мощность L3
apparent_power_l1	float	Чтение	ВА	Полная мощность L1
apparent_power_l2	float	Чтение	ВА	Полная мощность L2
apparent_power_l3	float	Чтение	ВА	Полная мощность L3

5) Компонент мониторинга.

Скрипт мониторинга предназначен для организации непрерывного обмена данными между солнечным инвертором SMA Sunny Tripower и реляционной базой данных MySQL.

Программный компонент выполняет следующие задачи:

- установление соединения с инвертором по протоколу Modbus TCP/IP (порт 502),
- группировка и чтение регистров для уменьшения числа запросов и ускорения опроса,
- преобразование «сырых» данных Modbus-регистров в инженерные величины (токи, напряжения, мощности, частота сети),

- запись обработанных данных в таблицу `sma_telemetry` базы данных.

Для работы используются следующие входные данные:

- IP-адрес инвертора,
- TCP-порт Modbus,
- `unit_id` устройства Modbus – 3,
- карта регистров – загружается из конфигурационного файла `Sma_ports.json` (адреса, количество регистров, тип интерпретации, масштаб, единица измерения),
- параметры подключения к БД – считываются из файла `setting.ini` (хост, порт, имя базы, пользователь, пароль).

Результатом работы программного компонента является словарь параметров, где ключ – это имя параметра (например, `dc_voltage_input_1`), а значение – числовое значение с учетом масштаба и единицы измерения, и запись в таблице `sma_telemetry` – каждая итерация опроса обновляет строку в базе данных, фиксируя актуальные параметры инвертора.

На рисунке 4.9 представлена блок-схема, отражающая алгоритм работы головной программы `main_sma`, входящей в программный пакет `SMA script`.

Работа алгоритма представляет собой следующую последовательность действий:

- На этапе инициализации формируются подключения к базе данных и инвертору `SMA` по протоколу Modbus TCP;
- После этого запускается бесконечный цикл опроса, в начале каждой итерации которого фиксируется текущее время;
- В цикле происходит обращение к инвертору для чтения регистров. При возникновении ошибки выполняется задержка равная одной секунде, и попытка чтения повторяется;
- В случае успешного чтения данные регистров проходят преобразование и фильтрацию: значения переводятся в числовую форму, очищаются от некорректных и «сломанных» показателей;
- если полученные данные непустые, они записываются в базу данных. При ошибке записи выполняется вывод сообщения об ошибке;
- После этого вычисляется время запроса и производится вывод данных. Итерация цикла завершается задержкой в 0,15 секунды;
- В случае прерывания работы пользователя выполняется корректное закрытие соединений и завершение программы;

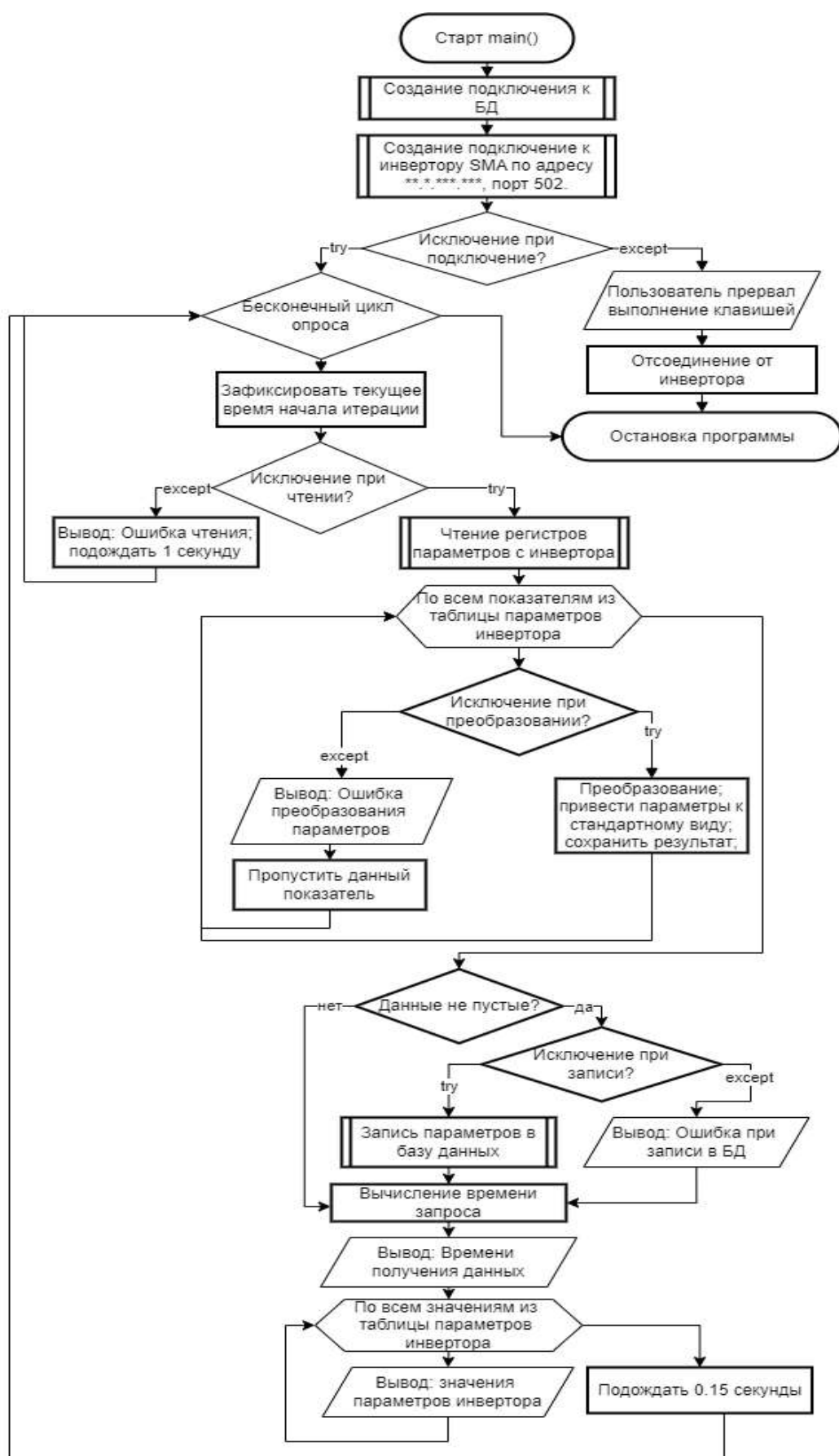


Рисунок 4.9 – Блок-схема программы main_sma

б) Сведения об исполняемом пакете.

Программный пакет SMA script содержит один основной код – main_sma.py.

main_sma.py – основной модуль, реализующий непрерывный цикл опроса инвертора, обработку полученных данных и их запись в базу данных. В этом модуле формируется логика программы верхнего уровня: запуск соединений, обработка ошибок и корректное завершение работы (приложение Г).

Также пакет содержит дополнительные компоненты:

- Sma_connect.py – компонент-коннектор для солнечного инвертора,
- connection_db.py – компонент-коннектор для подключения к сетевой БД,
- utils.py – унифицированная библиотека, содержащая функции кодирования и декодирования регистров данных, а также средства обработки ошибочных данных,
- create_file_and_path.py – компонент для работы с файловыми системами.

Подробное описание вспомогательных компонентов приведено в пункте 4.3.6.

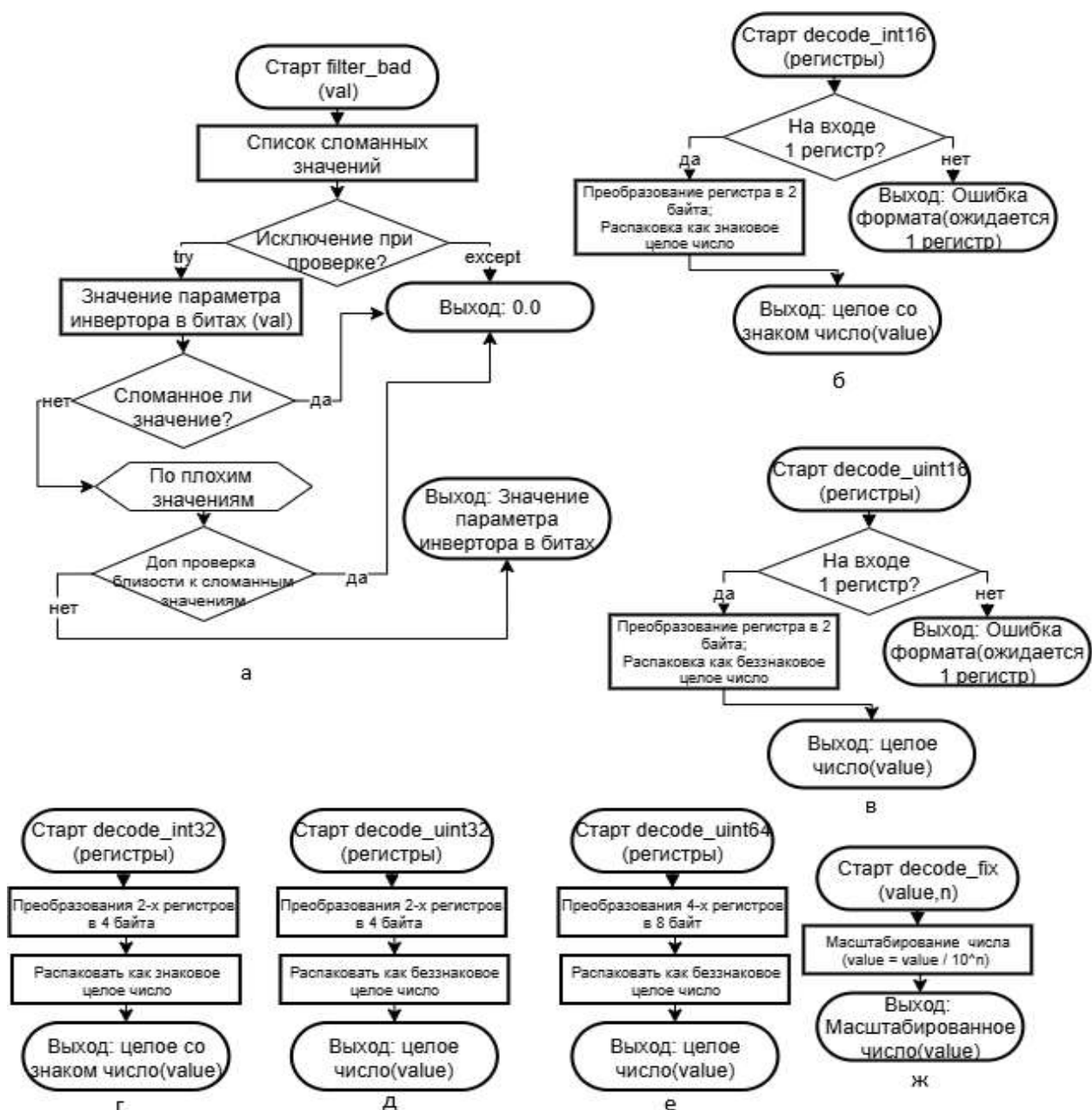
4.3.6 Дополнительные компоненты

С целью оптимизации программных пакетов системы мониторинга и управления испытательного стенда «Гибридная СНЭ», а также с целью облегчения эксплуатации и, при необходимости, переработки существующих и разработки новых подсистем ряд программных компонентов исполняемых пакетов был унифицирован. К таким компонентам относятся:

а) connection_db.py – универсальная утилита, обеспечивающая подключение к сетевой базе данных (приложение Г);

б) utils.py – модуль с набором функций-декодеров (decode_int16, decode_uint16, decode_int32, decode_uint32, decode_uint64) для преобразования значений регистров Modbus в числовые типы. Также содержит функцию decode_fix для масштабирования и filter_bad для фильтрации некорректных данных. Эти функции используются из других модулей при обработке телеметрии. На рисунке 4.10 приведены блок-схемы вспомогательных функций модуля Sma_modbus_utils, также входящего в программный пакет SMA script. Эти функции обеспечивают преобразование и очистку данных, поступающих от инвертора (см. рисунок 4.10):

- Каждая функция семейства decode_* преобразует список регистров Modbus в число заданного типа (целое знаковое или беззнаковое 16-, 32- или 64-битное);
- При несоответствии формата входных данных появляется ошибка;
- Функция decode_fix реализует масштабирование значений по формату FIX*n, то есть деление на 10n;



а) блок-схема функции filter_bad – проверка и фильтрация «сломанных» значений; б) блок-схема функции decode_int16 – преобразование регистра в 16-битное целое число со знаком; в) блок-схема функции decode_uint16 – преобразование регистра в 16-битное целое число без знака; г) блок-схема функции decode_int32 – преобразование двух регистров в 32-битное целое число со знаком; д) блок-схема функции decode_uint32 – преобразование двух регистров в 32-битное целое число без знака; е) блок-схема функции decode_uint64 – преобразование четырех регистров в 64-битное целое число без знака; ж) блок-схема функции decode_fix – масштабирование значения по формату FIX*n

Рисунок 4.10 – Блок-схемы для вспомогательных подпрограмм из программы Sma_modbus_utils

- Функция `filter_bad` проверяет полученное значение на принадлежность к заранее определенному множеству «сломанных» чисел. если значение совпадает с одним из эталонов ошибок (или отличается от них на величину допуска), то оно заменяется на 0.0;
- Предусмотрена обработка исключительных ситуаций, когда преобразование значения к числу невозможно.

Программный код модуля представлен в приложении Г:

а) `create_file_and_path.py` – утилитарный модуль для обеспечения корректной работы с файловой системой;

б) `contact_mqtt.py` – вспомогательный модуль для работы с MQTT-брокером. Содержит функции создания и настройки MQTT-клиента, установки соединения по параметрам `setting.ini`, обработки событий подключения/отключения и передачи клиента в основной модуль `main`;

в) `publish.py` – утилитарный модуль для отправки MQTT-сообщений, используемый для служебной публикации данных (например, тестовых сообщений, команд или дополнительных `keeralive`-запросов) в заданные топики. Может применяться как вспомогательный инструмент при наладке и тестировании подсистемы мониторинга.

Также в рамках унификации программного кода для каждой подсистемы были реализованы компоненты-коннекторы и функциональные компоненты, содержание которых напрямую зависит от типа и производителя оборудования, к нему относящегося, а также от используемых сетевых протоколов. Таким образом для рассмотренных подсистем были разработаны следующие компоненты (см. приложение Г):

– `load_connect.py` – программный код, содержащий классы устройств и связанные с ними функции для установления связи с модулями имитации нагрузки, чтения и отправки данных;

– `emulators_connect.py` – модуль сетевого взаимодействия с эмуляторами по TCP: создание и проверка «живости» сокета, корректное закрытие соединения, отправка команд и прием ответов с извлечением числовых значений, а также получение измеренных U/I и расчет мощности;

– `emulators_command.py` – модуль низкоуровневых команд управления: формирование и отправка команд в эмулятор (через сокет), а также набор функций для настройки режимов программного управления (например, выбор источников задания по напряжению и току);

– `emulators_callback.py` – модуль прикладной обработки управляющих воздействий: пакетная отправка набора уставок в эмулятор и логика предотвращения повторной отправки одинаковых команд (хранение предыдущего состояния уставок);

– `command_operator.py` – модуль «оператора» базы данных: чтение параметров эмуляторов из `PV_module_source`, чтение управляющих флагов из `control_scripts_signal` (разрешение/запрет работы и частных каналов), а также обновление телеметрии в `PV_DC_telemetry`;

– `victron_contact.py` – модуль, содержащий классы, отвечающие за взаимодействие с системой Victron по протоколу MQTT. В классе `VictronCommand` реализованы подписка на телеметрические топики, прием и разбор JSON-сообщений, формирование словаря параметров `dict_msg`, а также функция опроса `survey_victron` и отправка `keepalive`-сообщений. Вспомогательный класс/функции `Util` обеспечивают обработку и подготовку данных;

– `Sma_connect.py` – модуль, содержащий класс `SMAClient`, реализующий взаимодействие с инвертором SMA по протоколу Modbus TCP. В нем выполняется подключение к устройству, группировка регистров, чтение их содержимого, а также вызов функций декодирования и масштабирования значений.

5 Методика испытаний экспериментального образца гибридной СНЭ

5.1 Методика испытаний

5.1.1 Общие положения

Исследовательские испытания проводятся с целью:

- определения значений параметров установки (фактическая энергоёмкость, эффективности заряда-разряда, время отклика, саморазряд),
- проверки работоспособности макета гибридной СНЭЭ при работе на резкопеременную нагрузку,
- получения исходной информации для валидации математической модели гибридной СНЭЭ (временные диаграммы изменения тока и напряжения в точках присоединения суперконденсаторов и аккумуляторов, нагрузки),
- оценки соответствия техническому заданию и нормативным требованиям.

5.1.2 Испытательное оборудование

Исследовательские испытания будут проведены с использованием следующего оборудования:

- имитатор активной нагрузки – нагрузочный модуль НМ-50-Т400-К2 (технические характеристики см. в таблице 5.1),
- имитатор реактивной нагрузки – нагрузочный модуль НМ-Р-50-Т400-К1 (технические характеристики см. в таблице 5.2),
- двунаправленный (батарейный) инвертор Victron Quattro 48/10000/140-100/100 (технические характеристики см. в таблице 5.3),
- источник постоянного тока, состоящий из двух имитаторов солнечной электростанции Delta Elektronika BV SM 660-AR-11 и солнечного инвертора SMA Tripower 12000 TL (технические характеристики см. в таблице 5.4),
- система измерения электрических величин, построенная на основе преобразователей измерительных постоянного и переменного тока по типу ПИТ-500-УА-Б30 и ПИТ-20-У-4/20-Б14, преобразователей напряжения измерительных по типу ПИН-50-У-4/20-П и ПИН-300-У-4/20-П,
- лабораторный источник питания постоянного тока ТЕТРОН DC 0-300V 0-5A,
- осциллограф Rohde&Schwarz RTC1002,
- испытываемое оборудование: аккумуляторы YELLOW GB 12-2001, модули суперконденсаторные МСК-96-581.

Таблица 5.1 – Технические характеристики нагрузочного модуля НМ-50-Т400-К2

№ п/п	Параметр	Значение	
1	Мощность Активная электрическая нагрузка, $\cos \varphi = 0,99$	50 кВт	72,5 А
2	Количество ступеней мощности	8	
3	Мощности ступеней Ступень 1-2 Ступень 3 Ступень 4 Ступень 5-8	1 кВт 3 кВт 5 кВт 10 кВт	1,45 А 4,35 А 7,25 А 14,5 А
4	Напряжение тестируемой сети	400 В, 50 Гц	

Таблица 5.2 – Технические характеристики нагрузочного модуля НМ-Р-30-Т400-К2

№ п/п	Параметр	Значение	
1	Мощность Реактивная электрическая нагрузка	30 кВАр	43,45 А
2	Количество ступеней мощности	6	
3	Мощности ступеней Ступень 1-2 Ступень 3 Ступень 4 Ступень 5 Ступень 6	0,75 кВАр 2,25 кВАр 3,75 кВАр 7,5 кВАр 15 кВАр	1,08 А 3,26 А 5,43 А 10,9 А 21,7 А
4	Напряжение тестируемой сети	400 В, 50 Гц	

Таблица 5.3 – Технические характеристики двунаправленного инвертора Victron Quattro

№ п/п	Параметр	Значение
1	Диапазон напряжения переменного тока	187-265 В
2	Диапазон напряжения постоянного тока	38-66 В
3	Максимальная подача тока	2x100 А
4	Выходная мощность	10000 Вт
5	Пиковая мощность	20000 Вт

Таблица 5.4 – Технические характеристики солнечного инвертора SMA Tripower 12000 TL

№ п/п	Параметр	Значение
1	Максимальная входная мощность (со стороны постоянного тока)	18000 Вт
2	Максимальная выходная мощность переменного тока (со стороны переменного тока)	12000 Вт
4	Максимальный выходной ток	17,4 А

5.1.3 Нормативная база

При выполнении исследовательских испытаний следует руководствоваться ГОСТ Р 58092.2.1 [200], ГОСТ Р 58092.2.2 [201], ГОСТ Р МЭК 62391-1 [175] и ГОСТ Р МЭК 62391-2 [204].

5.2 Этапы проведения испытаний

5.2.1 Подготовительный этап

На подготовительном этапе испытаний должны быть проведены визуальный осмотр и первичные электрические замеры. Подготовительный этап испытаний необходимо проводить перед началом каждого испытания.

При визуальном осмотре должно быть зафиксировано отсутствие механических повреждений и корректность подключения клемм.

Перед началом проведения испытаний необходимо проверить напряжение холостого хода (аккумуляторы и суперконденсаторы), а также сопротивление изоляции ($> 1 \text{ МОм}$).

Результаты подготовительного этапа испытания представляют по форме таблицы 5.8 подраздела 5.3 «Пример таблиц протокола проведения испытаний».

5.2.2 Испытание для определения работоспособности системы мониторинга макета гибридной СНЭЭ

Испытание для определения работоспособности системы мониторинга макета гибридной СНЭЭ проводится в следующем порядке:

- 1) Задается график изменения нагрузки и интенсивности солнечного излучений в соответствии с данными таблицы 5.5;
- 2) Во время выполнения шестого этапа испытания в ручном режиме производится запуск ДГУ 12 кВт;
- 3) На протяжении всего испытания осуществляется мониторинг режима работы солнечного инвертора, имитатора нагрузки, ДГУ 12 кВт, батарейных инверторов.

Таблица 5.5 – График изменения нагрузки и интенсивности солнечного излучения

№ этапа	Продолжительность, сек	Интенсивность солнечного излучения, Вт/м ²	Нагрузка, кВт
1	60	1000	15
2	60	1000	12
3	60	800	12
4	60	800	9
5	60	600	9
6	60	600	6
7	60	800	6
8	60	800	9
9	60	1000	12
10	60	1000	15

5.2.3 Испытание для определения фактической энергоемкости

В соответствии с ГОСТ Р 58092.2.1 [200] последовательность проведения испытания следующая:

- 1) СНЭЭ разряжают до полностью разряженного состояния ($SOC = SOC_{min}$);
- 2) СНЭЭ заряжают до полностью заряженного состояния ($SOC = SOC_{max}$), поддерживая заданное значение нормированной входной мощности на уровне 2, 4, 6 кВт;
- 3) СНЭЭ разряжают до полностью разряженного состояния, поддерживая заданное значение нормированной выходной мощности на уровне 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 кВт. Во время разряда измеряют и регистрируют постоянную выходную мощность, длительность ее отдачи.

Фактическую энергоемкость E_0 (Вт·ч) рассчитывают следующим образом:

$$E_0 = \sum_{i=1}^n P_{oi} \Delta t, \quad (5.1)$$

где P_{oi} – активная выходная мощность в момент времени i Вт;

Δt – шаг дискретизации измерений по времени, ч;

n – время разряда, ч.

Результаты испытаний для определения фактической энергоемкости представляют по форме таблицы 5.9 подраздела 5.3 «Пример таблиц протокола проведения испытаний».

5.2.4 Испытание для определения диаграммы мощности

В соответствии с ГОСТ Р 58092.2.1 [200] в ходе испытаний «должно быть подтверждено, что макет гибридной СНЭЭ способен поглощать (использовать для заряда) постоянную нормированную входную активную мощность в течение определенного периода времени в соответствии с методом, изложенным ниже:

1) на шаге 2 испытания для определения фактической энергоемкости заряд осуществляют нормированной мощностью, измеряя входную мощность и длительность заряда;

2) на шаге 3 испытания для определения фактической энергоемкости разряд осуществляют постоянной нормированной мощностью, измеряют выходную мощность и длительность разряда.

5.2.5 Испытание для определения эффективности заряда-разряда

В соответствии с ГОСТ Р 58092.2.1 [200] в ходе испытаний для определения эффективности заряда-разряда определяют количества энергии, которое макет гибридной СНЭЭ может отдать, по отношению к количеству энергии, поглощенной ею во время предшествующего заряда.

Это испытание проводят в соответствии с методом испытания для определения фактической энергоемкости. По результатам выполнения цикла полное количество отдаваемой системой энергии должно быть равным энергоемкости системы.

Эффективность заряда-разряда вычисляют по формуле (5.2):

$$\eta = \frac{E_0}{E_I} \quad (5.2)$$

где E_0 – полная выходная энергия;

E_I – полная входная энергия.

Для всех измеренных величин рассчитывают средние значения, на основе которых вычисляют эффективность заряда-разряда.

5.2.6 Измерение времени отклика и скорости изменения выходной мощности

Время отклика СНЭЭ измеряют в соответствии с формулой (5.3) и методом, изложенным ниже:

$$RR = \frac{P(T_2) - P(T_1)}{T_2 - T_1}, \quad (5.3)$$

где T_1 – момент времени, в который активная мощность становится выше значения 10 % уставки;

T_2 – момент времени, в который активная мощность становится выше значения 90 % уставки.

В соответствии с ГОСТ Р 58092.2.1 [200] «СНЭЭ должна поглощать или отдавать активную мощность в соответствии с уставкой, настроенной на нормированную входную или выходную мощность. Уставку и входную или выходную мощность фиксируют при помощи системы сбора данных через равные интервалы времени с требуемым временным разрешением.

Для проведения испытаний:

- необходимо зарядить или разрядить макет гибридной СНЭЭ до $SOC = 50 \%$;
- задают уставку равной нулю. Уставку не меняют до тех пор, пока выходная мощность не составит $(0 \pm 2) \%$ от нормированной входной мощности;
- изменить уставку на нормированную входную мощность. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность не достигнет уровня в пределах 2 % от нормированной входной мощности. Время отклика на единичное ступенчатое возмущение и скорость изменения выходной переменной регистрируют под условными обозначениями SRT_1 и RR_1 соответственно;
- задать уставку равной нулю. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность не достигнет уровня $(0 \pm 2) \%$ от нормированной входной мощности. Время отклика на единичное ступенчатое возмущение и скорость изменения выходной переменной регистрируют под условными обозначениями SRT_2 и RR_2 соответственно;
- зарядить или разрядить СНЭЭ до $SOC = 50 \%$;
- изменить уставку на нормированную выходную мощность. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность не достигнет уровня в пределах 2 % от нормированной выходной мощности. Время отклика на единичное ступенчатое возмущение и скорость изменения выходной переменной регистрируют под условными обозначениями SRT_3 и RR_3 соответственно;
- задать уставку равной нулю. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность в ТПН не достигнет уровня $(0 \pm 2) \%$ от нормированной выходной мощности. Время отклика на единичное ступенчатое возмущение и скорость изменения выходной переменной регистрируют под условными обозначениями SRT_4 и RR_4 соответственно.

Настоящее испытание повторяют не менее трех раз.

Рекомендуемые при проведении испытания значения уставки приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Значения уставки при проведении испытания

№ этапа	Продолжительность, сек	Уставка мощности, кВт			Примечания
		Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	
1	60	0	0	0	-
2	60	-5	-10	-15	Нормированная входная мощность
3	60	0	0	0	-
4	60	5	10	15	Нормированная выходная мощность
5	60	0	0	0	-
6	60	5	10	15	Нормированная выходная мощность
7	60	0	0	0	-

5.2.7 Испытание для определения саморазряда

Испытание для определения саморазряда СНЭЭ выполняют следующим образом:

- 1) Зарядить макет гибридной СНЭЭ до $SOC = 100 \%$;
- 2) Отключить и оставить подсистему преобразования энергии СНЭЭ в отключенном состоянии в течение периода измерения саморазряда СНЭЭ. Период измерения саморазряда СНЭЭ выбрать из ряда: 1 час, 1 сутки или 1 неделя и указать в отчете об испытаниях;
- 3) Потерю энергии в результате саморазряда определить как разность доступных энергий до и после выполнения этапа 2 испытания;
- 4) Саморазряд макета гибридной СНЭЭ вычислить как отношение потери энергии в результате саморазряда, измеренной на этапе 3 к периоду измерения саморазряда.

Результаты испытания представляют по форме таблицы 5.11 подраздела 5.3 «Пример таблиц протокола проведения испытаний».

5.2.8 Испытания для определения рабочих характеристик СНЭЭ

Чтобы подтвердить эффективность снижения колебаний мощности для солнечной электростанции, СНЭЭ, которая заряжается и разряжается в соответствии с входной и выходной командой, должна быть проверена на правильность работы в соответствии с установленным профилем рабочего цикла.

При определении рабочих характеристик СНЭЭ, применяемой для уменьшения колебаний фотоэлектрической генерации следует применять рабочий цикл, приведенный в приложении А (таблица А.2) ГОСТ Р 58092.2.2 [201].

Испытание выполняют следующим образом:

- 1) СНЭЭ должна располагать требуемым начальным уровнем доступной энергии в соответствии с согласованным рабочим циклом,
- 2) СНЭЭ подвергают заданному рабочему циклу,
- 3) в конце цикла уровень доступной энергии СНЭЭ должен быть равен начальному.

5.2.9 Испытание по работе в динамических режимах

Методика проведения испытаний:

- 1) Перед проведением испытания осуществить полную зарядку системы до $SOC_{нач} = SOC_{max}$;

2) Сценарий проведения испытания № 1 включает первичную нагрузку до номинального разрядного тока длительностью 60 секунд и последовательное резкое увеличение нагрузки до 50 А на 10 секунд прямоугольным импульсом (для четкого определения времени отклика);

3) Сценарий проведения испытания № 2 включает первичную нагрузку до номинального разрядного тока длительностью 60 секунд и последовательное подключение нагрузки, имитирующей запуск асинхронного двигателя с пусковым током, 20, 40, 60, 80 А. График изменения тока при запуск асинхронного двигателя представлен в приложении Б и получен в соответствии с условиями, описанными в подразделе 1.4.

В ходе проведения испытаний фиксируются просадка напряжения (ΔU) при изменении нагрузки, разрядные токи суперконденсаторов и аккумуляторных батарей.

Испытания должны быть повторены при других значениях начального уровня заряда $SOC_{нач}$, равных $SOC_{нач} = 0,8 * SOC_{max}$; $0,6 * SOC_{max}$.

Критерии прохождения испытаний при просадке напряжения не менее 3 %:

- время работы суперконденсаторов – не менее 100 мс,
- снижение разрядного тока аккумуляторов – не менее 20 %.

5.2.10 Испытание по определению параметров схемы замещения суперконденсаторного модуля

Материальная часть испытания:

- 1) Модуль суперконденсатора Феникс МСК-96-58 – номинальная емкость 96 Ф, номинальное напряжение 58 В;

2) Источник постоянного тока ТЕТРОН 30005ЕП с режимом стабилизации тока, способный выдавать напряжение не менее 60 В и ток заряда до ~5 А;

3) Осциллограф для записи значений напряжения. Показатели снимаются на выводах СК с более точными показаниями прибора. Частота измерения параметров цепи чем меньше, тем лучше, чтобы проводить расчеты на более узком временном участке. Преимуществом записи осциллографа является то, что позволяет с высокой;

4) Коммутационная аппаратура и проводники – переключатель для быстрого перехода СК с заряда на саморазряд или его отключение, а также соединительные провода достаточного сечения и средства безопасности.

Подготовка к испытанию:

1) Перед началом измерений СК необходимо привести в нормализованное состояние. Рекомендуется выполнить 1-2 предварительных цикла «заряд–разряд» для стабилизации емкости. Далее модуль должен быть полностью разряжен: для соблюдения техники безопасности рекомендуется выполнять разряд на небольшое сопротивление, чтобы уменьшить значение напряжения до нуля. Это обеспечивает единые начальные условия перед испытанием. Все измерения проводятся при комнатной температуре;

2) Ознакомление с устройствами. Посмотреть в приложении данные устройств. Ознакомиться с интерфейсом управления источником питания и осциллографом;

3) Сборка схемы. Подключить СК Феникс МСК-96-58 к выводам источника постоянного тока ТЕТРОН 300005ЕП. Параллельно СК подсоединить датчики измерения напряжения и тока. Сенсоры снятия параметров находятся на задней части источника и подключаются параллельно основным контактам;

4) Начальные условия. Перед началом эксперимента убедиться, что напряжение на СК $U=0\text{ В}$ (полная разрядка). При необходимости разрядить его через малое сопротивление. Зафиксировать на измерительных датчиках остаточное напряжение ($\leq 0,15\text{ В}$).

Первоначальная настройка ТЕТРОН 30005ЕП:

1) Перед выполнением начала заряда выставить следующие настройки:

– $V_{set}=58\text{ В}$,

– $I_{set}=0\text{ А}$;

2) При выставлении тока $I_{set}\geq 0\text{ А}$ заряд будет проходить до момента, когда выровняется напряжение источника и СК;

3) Зарядка постоянным током. Установить на источнике режим стабилизации тока и задать ток заряда I_{set} . Ток должен быть достаточным для быстрой зарядки, но не превышать 10 % от максимально допустимого (во избежание нагрева электродов). Рекомендуемые значения тока:

$$I_{ch} \leq 0,05 \cdot I_{sc_m}. \quad (5.4)$$

Важно отметить, что можно производить зарядку и меньшими значениями тока, однако это повлечет за собой более долгое проведение испытания и менее заметные скачки напряжений и тока. В нашем случае из-за ограничения источника питания ток заряда равен 5 А.

Собранная схема представлена на рисунке 5.1. На ней представлена измерительная установка с вышеперечисленным оборудованием, на которой проводились эксперименты по регистрации переходных процессов напряжения и тока суперконденсаторного модуля.

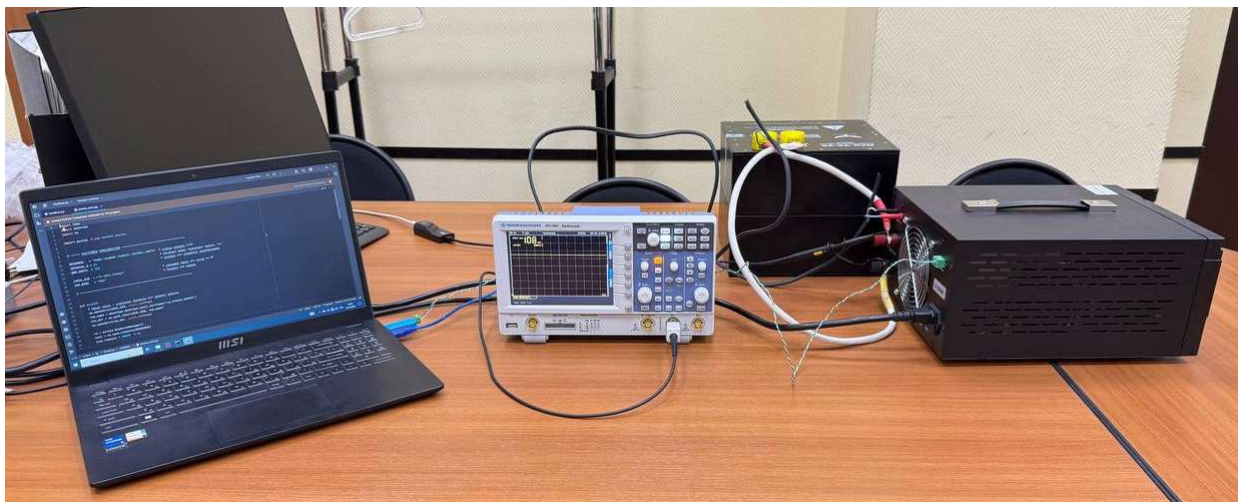


Рисунок 5.1 – Экспериментальный стенд для проведения измерений на суперконденсаторном модуле

Проведение испытания.

Проведение эксперимента можно выполнять как последовательно по шагам во время испытания (как приведено ниже), так и по обработке полного комплекта данных после полного выполнения испытания. Дальнейший расчет выполняется после завершения эксперимента. Для рассматриваемой методологии проведения испытания обязательно фиксируются 8 шагов со своими условиями, в момент которых определяются значения времени, напряжения и, частично, тока. Кроме того, последовательность шагов

совпадает с последовательностью определения параметров немедленной, отложенной и долгосрочной ветвей соответственно. Для записи параметров рекомендуется использовать таблицу, представленную в протоколе проведения испытаний приложения Д. Далее подробно рассмотрено проведение испытания по шагам:

1) Определение параметров немедленной ветви в момент $n=0 (t_0=0)$.

При начале измерений должны соблюдаться условия (5.5) (индекс u переменных означает номер шага):

$$\begin{cases} U_0=0 (\leq 0,05 \text{ мВ}); \\ Q_{tot}=0, \end{cases} \quad (5.5)$$

где U – напряжение на клеммах СК, В;

Q_{tot} – суммарный заряд СК, Кл.

При включении источника питания возникает скачок тока от нуля до выставленного значения. Таким образом, в нашем случае $I_{ch}=5 \text{ А}$;

2) $n=1 (t_1=t_0+\Delta t)$.

В момент достижения t_1 через выбранную разницу времени ($\Delta t=120 \text{ сек}$) фиксируется напряжение U_1 на измерительном приборе (измерения производятся на осциллографе) и время t_1 . Полученные данные фиксируются в таблице;

3) $n=2 (\Delta U=0,5 \text{ В})$.

Фиксируется возрастание напряжения с U_1 до U_2 на выбранное ΔU_2 . Фиксируется время t_2 . Напряжение на данном этапе:

$$U_2=U_1+\Delta U_2. \quad (5.6)$$

Полученные данные фиксируются в таблице;

4) $n=3 (U_3=U_{ном})$.

Фиксируется момент, когда напряжение U_3 становится равным $U_{ном}$. Отключается источник тока ($I_{ch}=0$), вызывая скачок тока от I_{ch} до нуля. Записывается напряжение U_3 время t_3 .

$$U_3=U_{ном}. \quad (5.7)$$

Полученные данные фиксируются в таблице;

5) $n=4(t_4=t_3+120\text{ мс})$.

В момент достижения t_3 через выбранную разницу времени ($\Delta t=120\text{ сек}$) фиксируется напряжение U_4 и время t_4 . Полученные данные фиксируются в таблице;

6) $n=5(\Delta U=0,5\text{ В})$.

Фиксируется падение напряжения с U_4 до U_5 на выбранное ΔU_5 . Фиксируется время t_5 . Напряжение на данном этапе:

$$U_5=U_4-\Delta U_5. \quad (5.8)$$

Полученные данные фиксируются в таблице;

7) Определение параметров отложенной ветви в момент $n=6(R_d \cdot C_d \approx 100\text{ сек})$.

Считается, что в данный момент можно определить параметры отложенной ветви с помощью расчетов перетока заряда, сделанных на основании расчетов. Итогом становится время момента $n=6$, определяемая по формуле (5.9):

$$t_6=t_5+3(R_d \cdot C_d). \quad (5.9)$$

Также можно задаться приблизительным временем, равным трем постоянным времени релаксации – отсчет $\approx 300\text{ сек}$ с момента события 5. В нашем случае $t_6=t_5+300\text{ сек}$. В нашем случае выбран данный вариант. Фиксируется напряжение U_6 . Полученные данные записываются в таблицу;

8) Определение параметров долгосрочной ветви в момент $n=7(\Delta U=0,5\text{ В})$.

Повторение действий, изложенных в событии 5: Фиксируется падение напряжения с U_6 до U_7 на выбранное ΔU_7 . Фиксируется время t_7 . Полученные данные записываются в таблицу;

9) $n=8(t_8=30\text{ мин})$.

Считается, что через полчаса перераспределение заряда в долгосрочную ветвь завершается, а все эквивалентные емкости имеют одинаковое напряжение U_8 . Фиксируется U_8 . Полученные данные записываются в таблицу.

По завершению проведения испытания убедиться, что полученные все необходимые данные. Выключить источник питания и иные приборы. если СК нагрелся, дать ему остыть перед повторным испытанием.

Проведение расчетов.

Событие 1. После короткого промежутка времени напряжение на выводах EDLC в основном определяется падением напряжения на сопротивлении немедленной ветви:

$$R_1 = \frac{V_1}{I_{ch}}. \quad (5.10)$$

Событие 2. Так как напряжение все еще мало, постоянная емкость равна:

$$C_{10} = I_{ch} \cdot \frac{\Delta t_2}{\Delta U_2}; \quad (5.11)$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1. \quad (5.12)$$

Событие 3. После снятия тока заряда можно рассчитать переменную емкость C_{11} и суммарный заряд Q_{tot} .

$$Q_{tot} = I_{ch} \cdot (t_4 - t_1) = C_{10} \cdot U_4; \quad (5.13)$$

$$C_{11} = \frac{2}{U_4} \cdot \left(\frac{I_{ch}(t_4 - t_1)}{U_4} - C_{10} \right). \quad (5.14)$$

Событие 5. На основе физики двойного слоя и рабочего диапазона напряжений ELDC дифференциальная емкость C_{diff} моделируется как сумма постоянной составляющей и линейно зависящей от напряжения:

$$C_{diff}(U) = C_{10} + C_{11} \cdot U_C; \quad (5.15)$$

$$U_C = U_4 - \frac{\Delta U_5}{2}. \quad (5.16)$$

Так как ΔU_5 мало, а C_2 считается разряженным, I_{tr} практически постоянен и определяется по формуле (5.17):

$$I_{tr} = C_{diff} \cdot \frac{\Delta U_5}{\Delta t_5}; \quad (5.17)$$

$$\Delta t_5 = t_5 - t_4. \quad (5.18)$$

Сопротивление R_2 определяется выражением (5.19):

$$R_2 = \frac{\left(U_4 - \frac{\Delta U_5}{2} \right) \cdot \Delta t_5}{C_{diff} \cdot \Delta U_5}. \quad (5.19)$$

Событие 6. Определяется время релаксации (если нужно) для точного понимания начала события 6 (см. формулу (5.9)). Так как $t_6 - t_5$ соответствует трем постоянным времени, перераспределение из немедленной ветви в отложенную заканчивается. Напряжения на конденсаторах выравниваются, емкость отложенной ветви вычисляется по балансу заряда:

$$Q_{tot} = C_2 \cdot U_6 + U_6 \left(C_{10} + \frac{C_{11}}{2} U_6 \right). \quad (5.20)$$

Следовательно:

$$C_2 = \frac{Q_{tot}}{U_6} - \left(C_{10} + \frac{C_{11}}{2} U_6 \right). \quad (5.21)$$

Событие 7. По аналогии с событием 5 рассчитывается переток из немедленной и отложенной ветвей в долгосрочную. На данном этапе можно как сохранить параметр C_{diff} из события 5, если $\Delta U_5 = \Delta U_7$ и $U_6 \approx U_4$, то есть когда напряжение слабо изменялось между этапами. В ином случае заново повторно рассчитывается дифференциальная емкость:

$$C_{diff}(U) = C_{10} + C_{11} \cdot U_{C_2}; \quad (5.22)$$

$$U_{C_2} = U_6 - \frac{\Delta U_7}{2}. \quad (5.23)$$

Так как ΔU_7 мало, а C_3 считается разряженным, ток I_{tr} можно считать постоянным и равным:

$$I_{tr} = \frac{U_6 - \frac{\Delta U_7}{2}}{R_l}. \quad (5.24)$$

Так как R_1 значительно меньше R_3 , ток I_{tr} в этот момент в основном протекает через долгосрочную ветвь. Тогда:

$$R_3 = \frac{\left(U_6 - \frac{\Delta U_7}{2} \right) \cdot \Delta t_7}{C_{diff} \cdot \Delta U_7}; \quad (5.25)$$

$$\Delta t_7 = t_7 - t_6. \quad (5.26)$$

Событие 8. К моменту, когда проходит 30 мин саморазряда, считается, что перераспределение заряда завершается. Долгосрочная емкость вычисляется по балансу заряда:

$$Q_{tot} = C_3 \cdot U_8 + C_2 \cdot U_8 + \left(C_{10} + C_{11} \cdot \frac{U_8}{2} \right) \cdot U_8. \quad (5.27)$$

Следовательно:

$$C_3 = \frac{Q_{tot}}{U_8} - \left(C_{10} + \frac{C_{11}}{2} U_8 \right) - C_2. \quad (5.28)$$

Результаты расчетов.

По итогам измерений (см. протокол измерений СК в приложении Д) и проведенному расчету суперконденсатора получаются параметры схемы замещения, представленные в таблице 5.7. Полный набор значений подтверждает корректность методики испытания, что позволяет уверенно использовать полученную модель суперконденсаторного модуля в дальнейших расчетах и моделировании переходных процессов.

Таблица 5.7 – Итоговые параметры расчетной схемы замещения суперконденсатора

Ветвь схемы	Параметр	Обозначение	Значение (по расчету)	Комментарий
Немедленная ветвь	Сопротивление ESR, мОм	R_1	12,2	Определяет мгновенный скачок напряжения при включении/выключении тока
	Постоянная емкость ветви, Ф	C_{10}	61,62	Базовая емкость, задающая начальный фронт заряда
	Переменная емкость ветви, Ф/В	C_{11}	1,49	Отвечает за рост дифференциальной емкости с напряжением
Отложенная ветвь	Сопротивление ветви, Ом	R_2	41,2	Формирует релаксацию напряжения на масштабе порядка сотен секунд
	Емкость ветви, Ф	C_2	6,37	Описывает перераспределение заряда после окончания заряда
Долгосрочная ветвь	Сопротивление ветви, Ом	R_3	75,1	Определяет медленную релаксацию и саморазряд на масштабе десятков минут
	Емкость ветви, Ф	C_3	15,2	Характеризует наиболее медленные процессы перераспределения заряда
Расчетные параметры	Эквивалентная емкость при $U = U_{ном}$, Ф	C_{diff}	144,2/147,9 ³	Сопоставляется с паспортной емкостью 96 Ф для оценки корректности модели
	Суммарный заряд, Кл	Q_{tot}	6092	Количество заряда, накопленная в схеме замещения суперконденсатора

5.3 Пример таблиц протокола проведения испытаний

Ниже приведен пример таблиц протокола проведения испытаний.

Таблица 5.8 – Результаты прохождения подготовительного этапа программы испытаний

№ п/п	Проверяемая характеристика	Результат	Примечания
1	Отсутствие механических повреждений		
2	Корректность подключения клемм		
3	Напряжение холостого хода батареи аккумуляторов		
4	Напряжение холостого хода батареи суперконденсаторов		
5	Сопротивление изоляции		

³ C_{diff} считался отдельно для события 5/события 7 соответственно.

Таблица 5.9 – Результаты прохождения испытания для определения работоспособности системы мониторинга макета гибридной СНЭЭ

№ п/п	Проверяемая характеристика	Наличие/отсутствие сигнала	Примечания
1	Получение данных о величине электрического тока батареи суперконденсаторов		
2	Получение данных о величине электрического напряжения батареи суперконденсаторов		
3	Получение данных о величине электрического тока батареи электрохимических аккумуляторов		
4	Получение данных о величине электрического напряжения батареи электрохимических аккумуляторов		
5	Получение данных о величине электрического тока со стороны постоянного тока батарейного инвертора		
6	Получение данных о величине электрического напряжения со стороны постоянного тока батарейного инвертора		
7	Получение данных о величине электрического тока со стороны переменного тока батарейного инвертора		
8	Получение данных о величине электрического напряжения со стороны переменного тока батарейного инвертора		

Таблица 5.10 – Определение фактической энергоемкости

№ п/п	Параметр	Методика	Результат			Примечания
			Входная/ выходная мощность, Вт	Время заряда/ разряда, сек		
1	2	3	4	5	6	7
1	Емкость аккумуляторов	1) Заряд до $SOC = SOC_{max}$; 2) Разряд номинальным током до $SOC = SOC_{min}$ при заданном значении выходной мощности				Ожидаемый результат: отклонение $\leq 5\%$ от паспортной емкости
2	Емкость суперконденсаторов	1) Заряд до $V = V_{max}$; 2) Разряд от $V = V_{max}$ до $V = \frac{1}{2} V_{max}$ при заданном значении выходной мощности				Ожидаемый результат: $C \geq 95\%$ от номинала
3	Общая емкость макета гибридной СНЭЭ	1) Обеспечение полного заряда СНЭЭ ($SOC = SOC_{max}$ и $V = V_{max}$); 2) Разряд СНЭЭ до $SOC = SOC_{min}$ или $V = \frac{1}{2} V_{max}$ (что наступит быстрее)				-

Таблица 5.11 – Определение эффективности заряда/разряда

№ п/п	Испытание	E_0 , Вт·ч	E_0 , Вт·ч	Эффективность заряда/разряда, КПД , %
1	2	3	4	7
1	Испытание 1			
2	Испытание 2			
3	Испытание 3			
4	Среднее значение			

5.4 Критерии успешности испытаний

В таблице 5.12 приведены основные критерии успешности испытаний экспериментального образца гибридной СНЭЭ.

Таблица 5.12 – Критерии успешности испытаний

Параметр	Методика	Критерий успешности
Емкость батареи суперконденсаторов	Заряд/разряд при $0,2 * I_{НОМ} \dots 1,0 * I_{НОМ}$	Не менее 1 А·ч (Вт·ч)
Емкость аккумуляторной батареи	Заряд/разряд при $0,2 * I_{НОМ} \dots 1,0 * I_{НОМ}$	Не менее 200 А·ч (Вт·ч)
Общая емкость гибридной СНЭЭ	Заряд/разряд при $0,2 * I_{НОМ} \dots 1,0 * I_{НОМ}$	Не менее 201 А·ч (Вт·ч)
КПД гибридной СНЭЭ	Заряд/разряд при $0,2 * I_{НОМ} \dots 1,0 * I_{НОМ}$	$\geq 92 \%$
Пиковый ток	Кратковременная нагрузка $2,0 * I_{НОМ}$	– Без отключения; – Электрический ток батареи СК – не менее 150 % от электрического тока батареи аккумуляторов

6 Предварительные испытания испытательного стенда «Гибридная СНЭ»

6.1 Испытания по моделированию резкопеременной нагрузки

Испытания проводятся при помощи разработанной подсистемы мониторинга и управления (см. пункт 4.3.2) с целью проверки готовности программных и аппаратных компонентов к проведению моделирования резкопеременной нагрузки.

Эксперимент проводился для блока имитации активной нагрузки на разных пакетах исходных данных с различными дискретностями времени, но анализ представлен для двух характерных экспериментов. Их программы представлены в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 – График нагрузки с дискретностью 100 мс

Номер п/п	Уставка нагрузки, кВт	Длительность, с
1	16	0,6
2	15	0,3
3	14	0,2
4	13	0,1
5	12	0,1
6	10	0,1
7	7	0,1
8	5	0,1
9	3	0,1
10	2	0,8
11	0	1

Таблица 6.2 – График нагрузки с дискретностью 150 мс

Номер п/п	Уставка нагрузки, кВт	Длительность, с
1	16	0,6
2	15	0,3
3	14	0,2
4	13	0,15
5	12	0,15
6	10	0,15
7	7	0,15
8	5	0,15
9	3	0,15
10	2	0,8
11	0	1

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что текущая конфигурация испытательного стенда не позволяет имитировать нагрузку с дискретностью 100 и менее миллисекунд. Вероятно, это связано с техническими

ограничениями переключателей блоков имитации. Графическое представление результатов эксперимента представлено на рисунке 6.1.

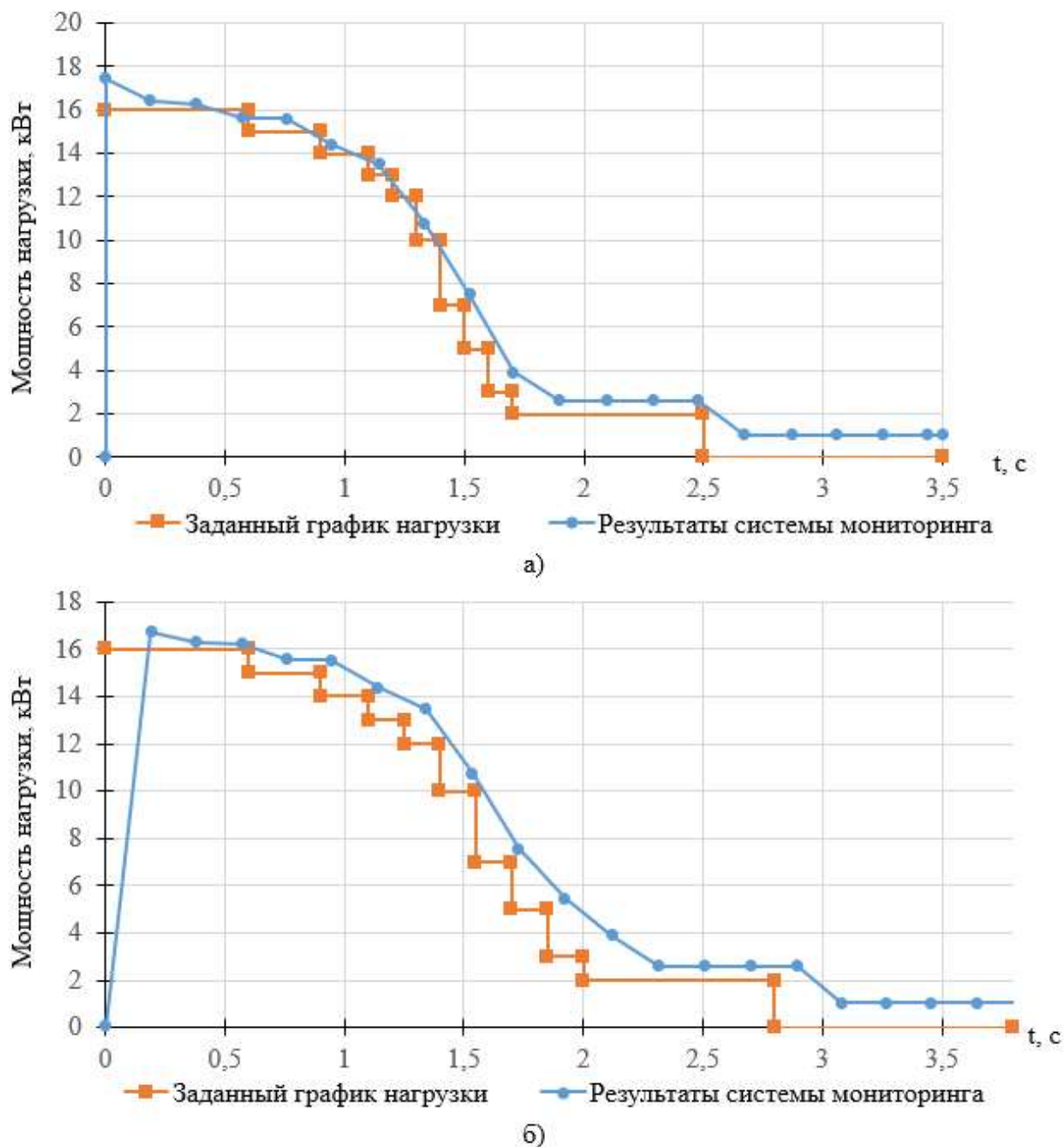


Рисунок 6.1 – Сравнение показателей системы мониторинга со значениями графика нагрузки: а) для дискретности времени равной 100 мс; б) для дискретности времени равной 150 мс

При дискретности 100 мс наблюдается пропуск значений уставок 12 и 5 кВт, что свидетельствует о недостаточной реакции аппаратной части на воздействия управления, принимаемые от программной части испытательного стенда.

Фиксируемые подсистемой мониторинга временные метки начала и конца изменения нагрузки в системе позволяют отследить границы переходных процессов, а также позволит отследить показатели системы испытательного стенда, полученные смежными подсистемами мониторинга.

Протоколы проведенных испытаний приведены в приложении Д.

6.2 Испытания гибридной СНЭ на нагрузку

Испытания проводятся при помощи разработанной подсистемы мониторинга (см. пункт 4.3.4) с целью проверки готовности испытательного стенда к проведению испытаний гибридной СНЭ в характерных режимах заряда и разряда.

Эксперимент проводился в формате автономной работы системы накопления энергии на случайную активную нагрузку произвольной длительности. Протоколы испытаний приведены в приложении Д.

Графические результаты предварительных длительных испытаний представлены на рисунках 6.2-6.5.

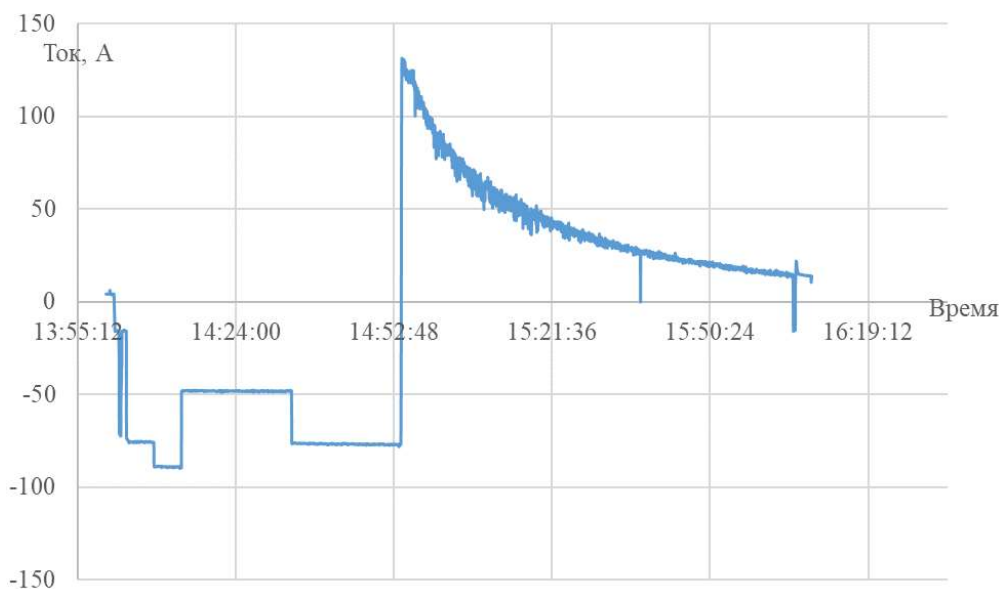


Рисунок 6.2 – Результаты мониторинга показателей тока на клеммах СНЭ

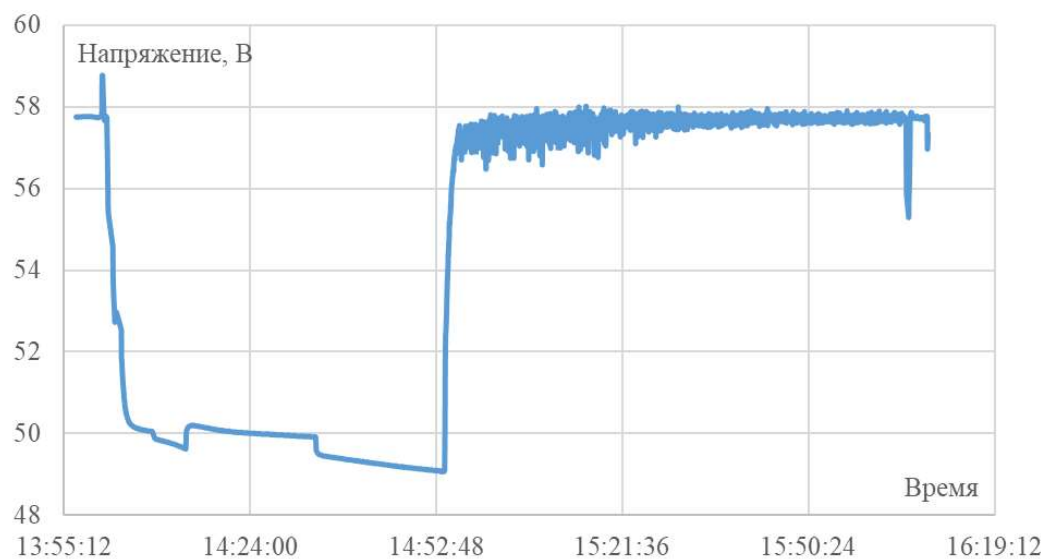


Рисунок 6.3 – Результаты мониторинга показателей напряжения на клеммах СНЭ

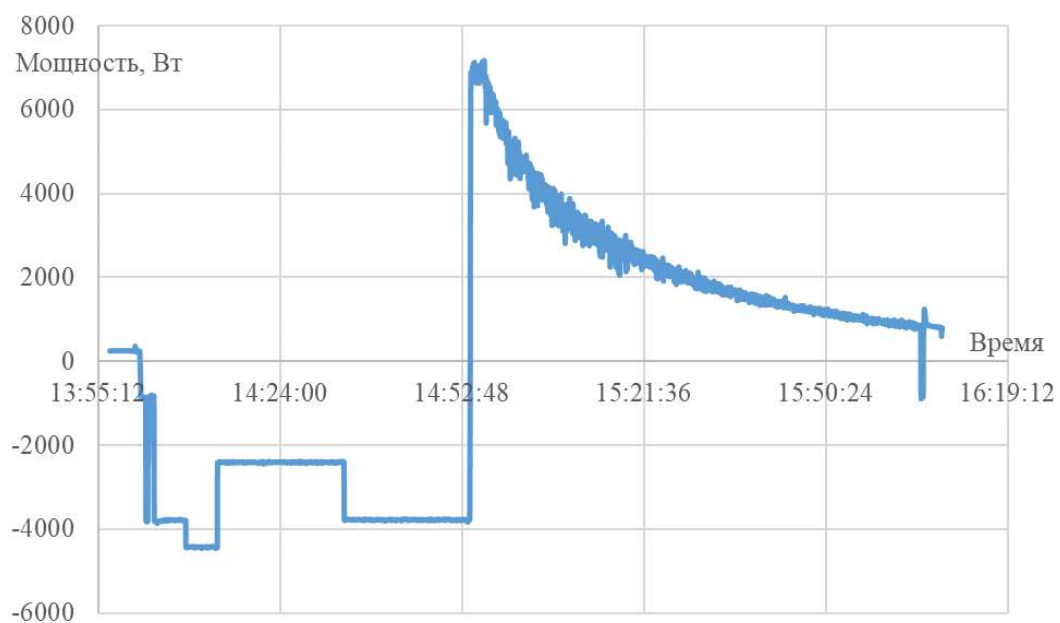


Рисунок 6.4 – Результаты мониторинга показателей мощности на клеммах СНЭ

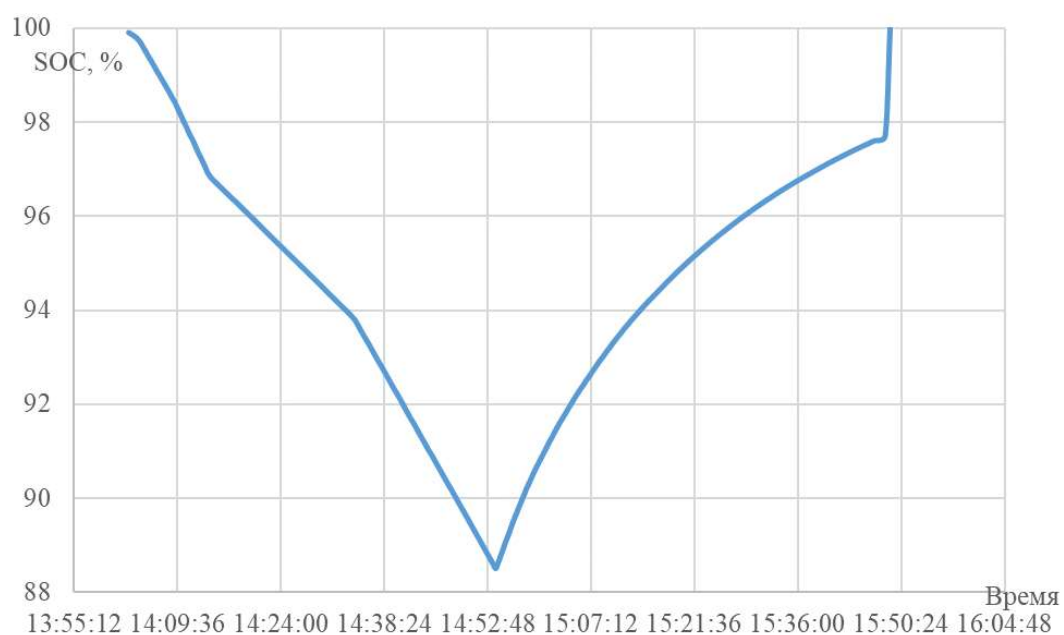


Рисунок 6.5 – Результаты мониторинга показателя уровня заряда СНЭ

Анализ графических результатов явно показывает, что результаты работы системы мониторинга испытательного стенда достаточны для наблюдения за режимными показателями системы накопления энергии, позволяют явно определять временные периоды режимов заряда и разряда СНЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения работ первого этапа за 2025 год «Создание экспериментального образца гибридной системы накопления энергии» получены следующие результаты:

1) Аналитический обзор существующих подходов к построению гибридных СНЭЭ для автоматизированных гибридных энергетических комплексов (АГЭК). В отчете показаны особенности структуры генерирующего оборудования и потребителей энергии существующих солнечно-дизельных комплексов, показано, что в большей части населенных пунктов, в которых реализованы подобные проекты есть резкопеременная нагрузка в виде асинхронных двигателей. Рассмотрены особенности инверторного оборудования солнечных электростанций и систем накопления энергии; собрана статистическая информация по техническим характеристикам оборудования наиболее часто применяемых фирм-производителей. Описаны схемы включения суперконденсаторов в системы накопления электрической энергии и проведены первичная численная оценка возможных эффектов от их использования; показано, что применение суперконденсаторов способно существенно снизить нагрузку на электрохимические накопители энергии;

2) Техническое задание на изготовление экспериментального образца гибридной СНЭЭ с учетом возможности проведения испытаний в условиях резкопеременных нагрузок;

3) Эскизная документация на экспериментальный образец гибридной СНЭЭ. Подготовлены принципиальные электрические схемы экспериментального образца гибридной СНЭЭ; проведен выбор компоновки размещения блока суперконденсаторов в составе имеющегося в НИУ «МЭИ» макета солнечно-дизельного комплекса;

4) Экспериментальный образец гибридной СНЭЭ, позволяющий исследовать влияние электрохимических аккумуляторов и суперконденсаторов на режимы работы АГЭК в переходных процессах. Разработаны линейные электрические схемы экспериментального образца гибридной СНЭЭ, а также схема размещения измерительного оборудования. Дано описание разработанных подсистем мониторинга параметров отдельных элементов экспериментального образца гибридной СНЭЭ и всего макета солнечно-дизельного комплекса;

5) Методика испытаний экспериментального образца гибридной СНЭЭ. На основе требований действующих ГОСТ подготовлена методика проведения исследовательских испытаний, проведение которых в соответствии с техническим заданием на НИОКР

запланировано на 2026 год, предназначенных для получения информации, необходимой для валидации математической модели экспериментального образца гибридной СНЭЭ. Проведены испытания по определению параметров схемы замещения единичного суперконденсатора, а также испытания, подтвердившие принципиальную работоспособность созданного экспериментального образца гибридной СНЭЭ.

В ходе выполнения работ достигнуты показатели, представленные в таблице Е.1 приложения Е.

Более подробная информация по публикациям и РИД представлена в приложении Ж.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мария Кутузова. Развитие локальной энергетики в удаленных районах Севера и Дальнего Востока России. В приоритете - использование возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] // Экспертный центр ПОРА. 2023. URL: <https://goarctic.ru/work/razvitie-lokalnoy-energetiki-v-udalennykh-rayonakh-severa-i-dalnego-vostoka-rossii/> (дата обращения: 16.09.2025).
2. Новые автоматизированные гибридные энергокомплексы дают импульс развитию удаленных районов Дальнего Востока [Электронный ресурс] // Вестник РусГидро. 2023. URL: <https://vestnik-rushydro.ru/articles/vrg/v-rossii/novye-avtomatizirovannye-gibridnye-energokompleksy-dayut-impuls-razvitiyu-udalennykh-rayonov-dalnego/> (дата обращения: 23.09.2025).
3. Наталия Харланова. В Якутии построят 7 гибридных комплексов с применением технологий солнечной энергетики [Электронный ресурс] // Твой Дальний Восток. 2023. URL: <https://tvoidv.ru/obshhestvo/v-yakutii-postroyat-7-gibridnyh-kompleksov-s-primeneniem-tehnologij-solnechnoj-energetiki/> (дата обращения: 13.08.2025).
4. Республика Якутия. Как регион развивает гибридные энергокомплексы в муниципальных районах [Электронный ресурс] // Ассоциация «Совет муниципальных образований Хабаровского края». 2025. URL: <https://cmokhv.ru/materials/mat20250701-m/> (дата обращения: 30.07.2025).
5. ЭНЭЛТ. Строительство 7 автономных гибридных энергокомплексов АГЭК ЭНЭЛТ в Республике Саха (Якутия).
6. Проекты модернизации локальной генерации // ПАО «РусГидро».
7. Солнечные электростанции [Электронный ресурс] // АО «РАО ЭС Востока». URL: <https://rao-esv.ru/activity/renewable-energy/solar-power/> (дата обращения: 15.07.2025).
8. Эвены. Энергообеспечение // Интерактивный атлас коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока: языки и культуры.
9. Кулун-Елбют [Электронный ресурс] // РосТендер. Все тендеры России. URL: <https://rostender.info/extsearch?query=be2af94d43a17af6cf5507c4f57f974b> (дата обращения: 23.09.2025).
10. Глава Республики Саха (Якутия). Об утверждении перечня потребителей электрической энергии (мощности), относящихся к категориям потребителей электрической энергии (мощности), ограничение режима потребления электрической

энергии которых может привести к экономическим, экологическим и социальным последствиям в Республике Саха (Якутия): 287-РГ. 2021.

11. Глава Республики Саха (Якутия). Об утверждении перечня потребителей электрической энергии (мощности), относящихся к категориям потребителей электрической энергии (мощности), ограничение режима потребления электрической энергии которых может привести к экономическим, экологическим и социальным последствиям в Республике Саха (Якутия): 464-РГ. 2025.

12. Годовой отчет за 2023 год [Электронный ресурс] // АО «Теплоэнергосервис». 2023. URL: <https://tes-ykt.ru/upload/matvopros1.3.pdf> (дата обращения: 08.08.2025).

13. В арктическом селе Эйик запущены автоматизированная дизельная электростанция и новая котельная [Электронный ресурс] // ВестиСаха. 2023. URL: <https://gtrksakha.ru/news/2023/01/14/v-arkticheskom-sele-ejik-zapusheny-avtomatizirovannaya-dizelnaya-elektrostanciya-i-novaya-kotel'naya/> (дата обращения: 24.07.2025).

14. На севере, в поселке Бетенкес, заработала новая дизельная электростанция [Электронный ресурс] // Первый республиканский информационно-аналитический портал «SakhaNews» («Новости Якутии»). 2007. URL: <https://1sn.ru/na-severe-v-poselke-betenkes-zarabotala-novaya-dizelnaya-elektrostanciya> (дата обращения: 23.07.2025).

15. В селе Юнкюр Верхоянского улуса Якутии установили новую автономную дизельную электростанцию и солнечную электростанцию [Электронный ресурс] // ДВ-РОСС - новости Дальнего Востока. 2015. URL: <http://trud-ost.ru/?p=401901> (дата обращения: 23.07.2025).

16. «РусГидро» ввело в эксплуатацию четыре современных ВИЭ-энергокомплекса в Якутии [Электронный ресурс] // PrimaMedia. 2022. URL: <https://primamedia.ru/news/1352929/> (дата обращения: 13.08.2025).

17. ГОСТ 23414-84 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые. Термины и определения.

18. Грехов Игорь. Силовая полупроводниковая электроника // Компоненты и Технологии. 2006. № 56. С. 106–111.

19. ГОСТ 20859.1-89 (СТ СЭВ 1135-88) Приборы полупроводниковые силовые. Общие технические требования.

20. Блейк Карл Б. К. IGBT или MOSFET: выбирайте с умом // Компоненты и технологии. 2015. № 5.

21. Томашевский Д.Н. Автономные инверторы: учебное пособие. Издательство Уральского университета, 2019.
22. Илюшин П. В., Симонов А. В. О функционировании распределенных источников энергии с силовыми преобразователями в составе энергосистем и изолированных энергорайонов // Релейная Защита И Автоматизация. 2020. № 2 (39). С. 30–38.
23. Инверторы. Классификация [Электронный ресурс] // Ваш Солнечный Дом. 2016. URL: <https://www.solarhome.ru/inverter/inverter-general-info.htm> (дата обращения: 20.08.2025).
24. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT // Силовая электроника. 2012. № 4.
25. Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 1 // Силовая электроника.
26. Гибридные инверторы - сравнение возможностей [Электронный ресурс] // Ваш Солнечный Дом. 2025. URL: <https://www.solarhome.ru/inverter/bat-inverter/hybrid-inverters.htm> (дата обращения: 21.08.2025).
27. Экра. Инвертор напряжения статический ИНС [Электронный ресурс] // ekra.ru. URL: <https://ekra.ru/product/nku-kru/ist-besper-pit/ins/> (дата обращения: 10.12.2025).
28. Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 N 937 (ред. от 21.02.2025) «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».
29. ГОСТ 27699-88 Системы бесперебойного питания приемников переменного тока. Общие технические условия.
30. ГОСТ 24376-91 Инверторы полупроводниковые. Общие технические условия.
31. ГОСТ 26282-84 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые мощностью до 5 кВ·А. Параметры.
32. ГОСТ 26830-86 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые силовые мощностью до 5 кВ·А включительно. Общие технические условия.
33. ГОСТ 25953-83 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые мощностью 5 кВ·А и выше. Параметры.
34. SMA. Sunny Tripower 3.0 / 4.0 / 5.0 / 6.0: Datasheet.
35. SMA. Sunny Island 4.4M / 6.0H / 8.0H: Datasheet.
36. SMA. Sunny Boy 3.0 / 3.6 / 4.0 / 5.0 / 6.0: Datasheet.

37. SMA. Sunny Boy Smart Energy 3.6 / 4.0 / 5.0 / 6.0: Datasheet.
38. SMA. Sunny Boy Storage 2.5: Datasheet.
39. SMA. Sunny Boy Storage 3.7 / 5.0 / 6.0: Datasheet.
40. SMA. Sunny Central Storage UP: Datasheet.
41. SMA. Sunny Central Storage UP-S: Datasheet.
42. SMA. Sunny Central Storage UP-XT SCS 2300 UP-XT / SCS 2400 UP-XT / SCS 2530 UP-XT / SCS 2630 UP-XT: Datasheet.
43. SMA. Sunny Central Storage UP-XT SCS 3450 UP-XT / SCS 3600 UP-XT / SCS 3800 UP-XT / SCS 3950 UP-XT: Datasheet.
44. SMA. Sunny Central UP 2667-3067 kVA: Datasheet.
45. SMA. Sunny Central UP 4000-4600 kVA: Datasheet.
46. SMA. Sunny Highpower PEAK3: Datasheet.
47. SMA. Sunny Highpower Storage: Datasheet.
48. SMA. Sunny Island X: Datasheet.
49. SMA. Sunny Tripower 8.0 / 10.0: Datasheet.
50. SMA. Sunny Tripower 125: Datasheet.
51. SMA. Sunny Tripower CORE2: Datasheet.
52. SMA. Sunny Tripower Smart Energy 5.0 / 6.0 / 8.0 / 10.0: Datasheet.
53. SMA. Sunny Tripower Storage X: Datasheet.
54. SMA. Sunny Tripower X: Datasheet.
55. Sungrow. SC2750UD-MV/SC3150UD-MV/ SC3450UD-MV: Datasheet.
56. Sungrow. SC4000UD-MV: Datasheet.
57. Sungrow. SC5000UD-MV: Datasheet.
58. Sungrow. SC5500UD-MV/SC6300UD-MV/ SC6900UD-MV: Datasheet.
59. Sungrow. SG2.0/2.5/3.0RS-S: Datasheet.
60. Sungrow. SG3.0/3.6/4.0RS: Datasheet.
61. Sungrow. SG5.0/6.0/7.0/8.0/10/12RT: Datasheet.
62. Sungrow. SG5.0/6.0RS: Datasheet.
63. Sungrow. SG8.0/9.0/10RS: Datasheet.
64. Sungrow. SG15/17/20RT: Datasheet.
65. Sungrow. SG25/30/33CX-P2: Datasheet.
66. Sungrow. SG33/40/50CX: Datasheet.
67. Sungrow. SG36/40/50CX-P2: Datasheet.

68. Sungrow. SG110CX: Datasheet.
69. Sungrow. SG125CX-P2: Datasheet.
70. Sungrow. SG150CX: Datasheet.
71. Sungrow. SG250HX-20: Datasheet.
72. Sungrow. SG285HX: Datasheet.
73. Sungrow. SG333HX: Datasheet.
74. Sungrow. SG350HX: Datasheet.
75. Sungrow. SG1100UD: Datasheet.
76. Sungrow. SG1100UD-20: Datasheet.
77. Sungrow. SG1100UD-MV: Datasheet.
78. Sungrow. SG1100UD-MV-20: Datasheet.
79. Sungrow. SG3125/3400HV-MV-30: Datasheet.
80. Sungrow. SG3300UD-20: Datasheet.
81. Sungrow. SG3300UD-MV SG4400UD-MV: Datasheet.
82. Sungrow. SG3300UD-MV-20: Datasheet.
83. Sungrow. SG3300UD/SG4400UD: Datasheet.
84. Sungrow. SG4400UD-20: Datasheet.
85. Sungrow. SG4400UD-MV-20: Datasheet.
86. Sungrow. SG6250HV-MV/ SG6800HV-MV: Datasheet.
87. Sungrow. SG6600UD-MV-20: Datasheet.
88. Sungrow. SG6600UD-MV SG8800UD-MV: Datasheet.
89. Sungrow. SG8800UD-MV-20: Datasheet.
90. Sungrow. SH3.0/3.6/4.0/5.0/6.0RS: Datasheet.
91. Sungrow. SH5.0/6.0/8.0/10RT-20: Datasheet.
92. Sungrow. SH8.0/10RS: Datasheet.
93. Sungrow. SH15/20/25T: Datasheet.
94. Kehua. BCS100K~200K-B-HM X2: Datasheet.
95. Kehua. BCS100K~500K-A Series: Datasheet.
96. Kehua. BCS1000K~1250K-C-HUD-US Series: Datasheet.
97. Kehua. BCS1250-1725K-B-HUD Series: Datasheet.
98. Kehua. BCS2500K-B-HUD: Datasheet.
99. Kehua. GSE-T Series Power Converter: Datasheet.
100. Kehua. iStoragE1: Datasheet.

101. Kehua. iStoragE3: Datasheet.
102. Kehua. SP15~25K-B X2 Series: Datasheet.
103. Kehua. SPI8K~12K-B X2 Series: Datasheet.
104. Kehua. SPI30~36K-B X2 Series: Datasheet.
105. Kehua. SPI50-60K-B X2 Series: Datasheet.
106. Kehua. SPI100~125K-B X2: Datasheet.
107. Kehua. SPI100K~125K-B Series: Datasheet.
108. Kehua. SPI250K-B-H: Datasheet.
109. Kehua. SPI250K-B-H X2/X2P Series: Datasheet.
110. Kehua. SPI300K~350K-B-H/H1 Series: Datasheet.
111. Kehua. SPI7000~10000-B X2 Series: Datasheet.
112. Goodwe. BTC Series: Datasheet.
113. Goodwe. DNS G3 Series 3-6kW: Datasheet.
114. Goodwe. DNS G4 Series 3-6kW: Datasheet.
115. Goodwe. EH PLUS+ Series: Datasheet.
116. Goodwe. ES G2 Series: Datasheet.
117. Goodwe. ES Uniq Series: Datasheet.
118. Goodwe. ET G2 Series: Datasheet.
119. Goodwe. ET Series: Datasheet.
120. Goodwe. ETC Series: Datasheet.
121. Goodwe. GT Series: Datasheet.
122. Goodwe. HT Series 73-120 kW: Datasheet.
123. Goodwe. HT Series 225/250 kW: Datasheet.
124. Goodwe. LVMT Series: Datasheet.
125. Goodwe. LVSM T Series: Datasheet.
126. Goodwe. MIS Series 1.6-2kW: Datasheet.
127. Goodwe. MS G3 Series 5-10kW: Datasheet.
128. Goodwe. MS G4 Series 7.5-10kW: Datasheet.
129. Goodwe. SBP G2 Series: Datasheet.
130. Goodwe. SDT G3 Series 4-30kW: Datasheet.
131. Goodwe. SDT G3 Series 25-40kW: Datasheet.
132. Goodwe. SDT G3 Series 50kW: Datasheet.
133. Goodwe. SMT Series 25-36kW: Datasheet.

134. Goodwe. SMT Series 50-60kW: Datasheet.
 135. Goodwe. SMT Series 50-80kW: Datasheet.
 136. Goodwe. UT Series: Datasheet.
 137. Goodwe. XS G3 Series 0.7-3.3kW: Datasheet.
 138. Kstar. KAC50DP: Datasheet.
 139. Kstar.
- G350KTHC/G350KTH/KSG-250UH-M0/GSM2500D/GSM3125D/GSM2500D-MV/GSM3125D-MV/GSM5000D-MV/GSM6250D-MV: Datasheet.
140. Victron energy. Quattro II: Datasheet.
 141. Victron energy. Quattro 3kVA-15kVA: Datasheet.
 142. Victron energy. MultiPlus II-GX 4k5-6k5: Datasheet.
 143. Victron energy. MultiPlus II-GX: Datasheet.
 144. Victron energy. MultiPlus II 4k5-6k5: Datasheet.
 145. Victron energy. MultiPlus II: Datasheet.
 146. Victron energy. MultiPlus 800VA-5kVA: Datasheet.
 147. Victron energy. MultiPlus 500VA-2000VA: Datasheet.
 148. Victron energy. Multi RS Solar: Datasheet.
 149. Victron energy. EasySolar II: Datasheet.
 150. Victron energy. EasySolar: Datasheet.
 151. De Carne G. и др. The role of energy storage systems for a secure energy supply: A comprehensive review of system needs and technology solutions // Electr. Power Syst. Res. 2024. T. 236. С. 110963.
 152. Kotarbinski M. и др. A 2023 Perspective: What Is the Value of Hybridization? NREL/TP--5000-87824, 2331419, MainId:88599. 2024. С. NREL/TP--5000-87824, 2331419, MainId:88599.
 153. Hybrid Energy Storage Market Size, Industry Growth Report 2032 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.datamintelligence.com/research-report/hybrid-energy-storage-market> (дата обращения: 16.12.2025).
 154. <https://www.datamintelligence.com> S. T. T. DataM Intelligence. Hybrid Energy Storage Market Size, Industry Growth Report 2032 [Электронный ресурс] // DataMIntelligence. 2025. URL: <https://www.datamintelligence.com/research-report/hybrid-energy-storage-market> (дата обращения: 16.12.2025).

155. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ Р 58092.1-2021. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения: ГОСТ Р 58092.1-2021. 2021. С. 44.
156. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ Р 58092.3.1-2020. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования: ГОСТ Р 58092.3.1-2020. 2020. С. 39.
157. Benefits of Supercapacitor-Based Energy Storage Systems [Электронный ресурс]. URL: <https://emtel.group/benefits-of-supercapacitor-based-energy-storage-systems/> (дата обращения: 16.12.2025).
158. Романюк Никита Сергеевич и др. Исследование гибридных систем накопления энергии на основе суперконденсаторов. Окружающая среда и энерговедение, 2024.
159. Supercapacitors: Functions, Reliability, and Limitations [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://renewablesadvice.com/battery/supercapacitors/> (дата обращения: 16.12.2025).
160. Доброго К.В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии // Энергетика Известия Высших Учебных Заведений И Энергетических Объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 215–232.
161. Energy EarthShots. Findings from Storage Innovations 2030. Supercapacitors. U.S. Department of Energy, 2023. С. 20.
162. Supercapacitor Battery Energy Storage System Market [Электронный ресурс] // TechSci Research LLC. 2024. URL: <https://www.techsciresearch.com/report/supercapacitor-battery-energy-storage-system-market/23133.html> (дата обращения: 24.10.2025).
163. Obulesu D., Mastanamma Y., Sunanda S. Supercapacitor-Battery Hybrid Storage Systems to Grid-Tied Photovoltaic Setups to Improve Energy Management and System Stability. 2025.
164. European Commission. Directorate General for Energy. и др. Study on energy storage. LU: Publications Office, 2023.
165. Recep Tayyip Erdoğan University, Şahin M. Modelling of Supercapacitors Based on Simplified Equivalent Circuit // CPSS Trans. Power Electron. Appl. 2021. Т. 6, № 1. С. 31–39.
166. Paravannoor A., K.V. B. Supercapacitors and Their Applications: Fundamentals, Current Trends, and Future Perspectives. 1-е изд. Boca Raton: CRC Press, 2023.

167. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ Р 57437-2017. Конденсаторы. Термины и определения: ГОСТ Р 57437-2017. 2017. С. 15.
168. Различия между суперконденсаторами и обычными конденсаторами [Электронный ресурс] // CRE New Energy Technology. 2021. URL: <https://ru.cre-elec.com/news/differences-between-supercapacitors-and-conventional-capacitors/> (дата обращения: 09.08.2025).
169. Абрамова Олеся. Как устроен суперконденсатор [Электронный ресурс] // Best Energy. Системы электропитания. 2016. URL: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-209> (дата обращения: 09.08.2025).
170. Васильев Алексей. Конденсатор вместо аккумулятора [Электронный ресурс] // Сетевое издание «Elec.ru». 2014. URL: <https://www.elec.ru/publications/promyshlennoe-oborudovanie/1713/> (дата обращения: 09.08.2025).
171. В чем различие между литий-ионным аккумулятором и суперконденсатором [Электронный ресурс] // Образовательный сайт «Школа для электрика». URL: <https://electricalschool.info/power/2805-v-chem-razlichie-mezhdu-litij-ionnym-akkumulyatorom-i-superkondensatorom.html> (дата обращения: 10.08.2025).
172. Аврора Ли. Суперконденсатор против батареи, что лучше? [Электронный ресурс] // Tycorun. 2024. URL: <https://www.huntkeyenergystorage.com/ru/supercapacitor-vs-battery/> (дата обращения: 10.08.2025).
173. Новая энергетика: от аккумуляторных батарей до суперконденсаторов [Электронный ресурс] // Materials Research Centre. 2011. URL: <https://mrc.org.ua/novosti-nauki-mrc/90-akkumulatorniye-batarei-i-superkondensatori> (дата обращения: 10.08.2025).
174. Писарева Т.А., Борисова Е.М., Решетников С.М. Создание и изучение эффективных суперконденсаторов на основе двойного электрического слоя. Учебное пособие. Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2021. 96 с.
175. ГОСТ Р МЭК 62391-1-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Конденсаторы постоянной емкости с двойным электрическим слоем для электрического и электронного оборудования. Часть 1. Общие технические условия : НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: дата введения 2023-09-12 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Российский институт стандартизации , 2023. – 50 с.
176. Supercapacitor Market Research Report 2033 [Электронный ресурс] // DataIntel. 2024. URL: <https://dataintel.com/report/supercapacitor-market> (дата обращения: 08.10.2025).

177. Supercapacitor-Market [Электронный ресурс] // MarketsAndMarkets. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/report-search-page.asp?rpt=supercapacitor-market> (дата обращения: 11.10.2025).

178. Morcellators Market Size, Share & Industry Analysis, By Products (Manual Morcellators, Power Morcellators), By Application (Laparoscopy, Hysterectomy, Uterine Myomectomy, Others), By End-User (Hospitals & Ambulatory Surgery Centres, Specialty Clinics, Others) and Regional Forecast, 2025-2032 [Электронный ресурс] // Fortune Business Insights Source: <https://www.fortunebusinessinsights.com/morcellators-market-103105>. 2024. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/morcellators-market-103105> (дата обращения: 10.10.2025).

179. Supercapacitor Market [Электронный ресурс] // Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/supercapacitor-market/> (дата обращения: 12.10.2025).

180. Supercapacitor Market Size, Share, Trends and Forecast by Product Type, Module Type, Material Type, End Use Industry, and Region, 2025-2033 [Электронный ресурс] // Imarc. Transforming Ideas into Impact. 2024. URL: <https://www.imarcgroup.com/supercapacitor-market> (дата обращения: 12.10.2025).

181. How effective are supercapacitors compared to batteries in peak shaving applications | NenPower [Электронный ресурс]. URL: <https://nenpower.com/blog/how-effective-are-supercapacitors-compared-to-batteries-in-peak-shaving-applications/> (дата обращения: 16.12.2025).

182. Adedaja O. S., Sadiku E. R., Hamam Y. An Overview of the Emerging Technologies and Composite Materials for Supercapacitors in Energy Storage Applications // Polymers. 2023. Т. 15, № 10. С. 2272.

183. B. Cloet. Supercapacitors Give Energy Storage New Impulse [Электронный ресурс] // Sirris. Innovation Forward. 2024. URL: <https://www.sirris.be/en/inspiration/supercapacitors-give-energy-storage-new-impulse> (дата обращения: 24.10.2025).

184. Study on Energy Storage. Energy Transition Expertise Centre (EnTEC), 2023.

185. Babu T. S. и др. A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects // IEEE Access. 2020. Т. 8. С. 148702–148721.

186. Navarro G. и др. Present and Future of Supercapacitor Technology Applied to Powertrains, Renewable Generation and Grid Connection Applications // *Energies*. 2021. Т. 14, № 11. С. 3060.
187. El-Sayed M. Essa M. e.a. Improving Micro-Grid Management: A Review of Integration of Supercapacitor Across Different Operating Modes // *Heliyon*. 2025. Т. 11. С. 1–32.
188. Grün T., Doppelbauer M. Comparative Concept Study of Passive Hybrid Energy Storage Systems in 48 V Mild Hybrid Vehicles Varying Lithium-Ion Battery and Supercapacitor Technologies // *World Electr. Veh. J.* 2019. Т. 10, № 4. С. 71.
189. Pipicelli M. и др. Assessment of Battery–Supercapacitor Topologies of an Electric Vehicle under Real Driving Conditions // *Vehicles*. 2023. Т. 5, № 2. С. 424–445.
190. Narvaez Cubillos E. A., Cortés Guerrero C. A., Trujillo Rodríguez C. L. Topologies for Battery and Supercapacitor Interconnection in Residential Microgrids with Intermittent Generation // *Ingeniería*. 2020. Т. 25, № 1. С. 6–19.
191. Hakuni P. Hybrid Energy Storage System for Renewable Power Grid.
192. Keskinen K. ENERGY STORAGE IN HIGH-POWER STATCOM APPLICATIONS.
193. Kroičs K., Staņa Ģ. Bidirectional Interleaved DC–DC Converter for Supercapacitor Energy Storage Integration with Reduced Capacitance // *Electronics*. 2022. Т. 12, № 1. С. 126.
194. Modeling of Supercapacitors as an Energy Buffer for Cyber-Physical Systems // *Cyber-Physical Systems*. 0 изд. / под ред. Siddesh G. M. и др. Chapman and Hall/CRC, 2015. С. 190–209.
195. Zubieta L., Bonert R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2000. Т. 36, № 1. С. 199–205.
196. Supercapacitor - Electrochemical double-layer capacitor - MATLAB [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/supercapacitor.html> (дата обращения: 16.12.2025).
197. ГОСТ Р 15.101-2021. Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2021-08-24 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 17 с.
198. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения: межгосударственный

стандарт: дата введения 1982-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ , 2011. – 24 с.

199. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2017-03-10 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии . – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 16 с.

200. ГОСТ Р 58092.2.1-2020 (МЭК 62933-2-1:2017). Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВОК И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ. Общее описание: НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: дата введения 2020-06-11 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ , 2020. – 34 с.

201. ГОСТ Р 58092.2.2-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы накопления электрической энергии. Параметры установок и методы испытаний. Области применения и определение рабочих характеристик: НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: дата введения 2023-01-30 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ , 2023. – 58 с.

202. Модули Суперконденсаторные Феникс МСК-96-58 [Электронный ресурс] // ООО «Ультраконденсаторы Феникс». URL: <https://www.ultracapacitor.ru/catalog/superkondensatory-feniks/moduli-superkondensatorov-feniks/moduli-superkondensatornye-feniks-msk-96-58/> (дата обращения: 19.07.2025).

203. Аккумулятор YELLOW GB 12-200 [Электронный ресурс] // YELLOW. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. URL: <https://yellow-battery.ru/akb/gb/gb-12-200> (дата обращения: 11.07.2025).

204. ГОСТ Р МЭК 62391-2-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Конденсаторы постоянной емкости с двойным электрическим слоем для электрического и электронного оборудования. Часть 2. Групповые технические условия на конденсаторы для силового электрического и электронного оборудования: НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: дата введения 2023-09-14 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Российский институт стандартизации , 2023. – 24 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Статистическая информация

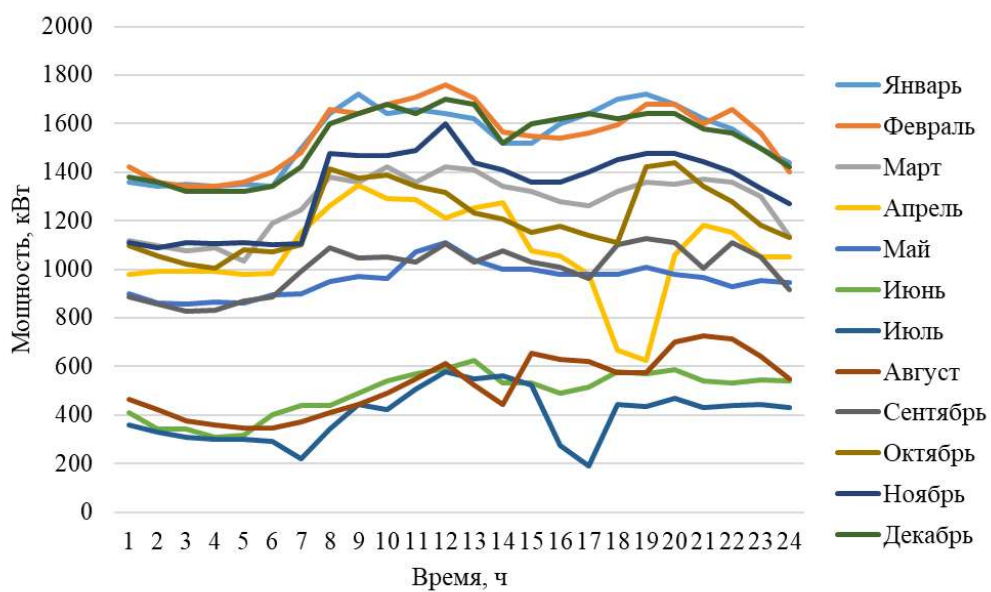


Рисунок А.1 – График нагрузки характерных суток с. Хонуу

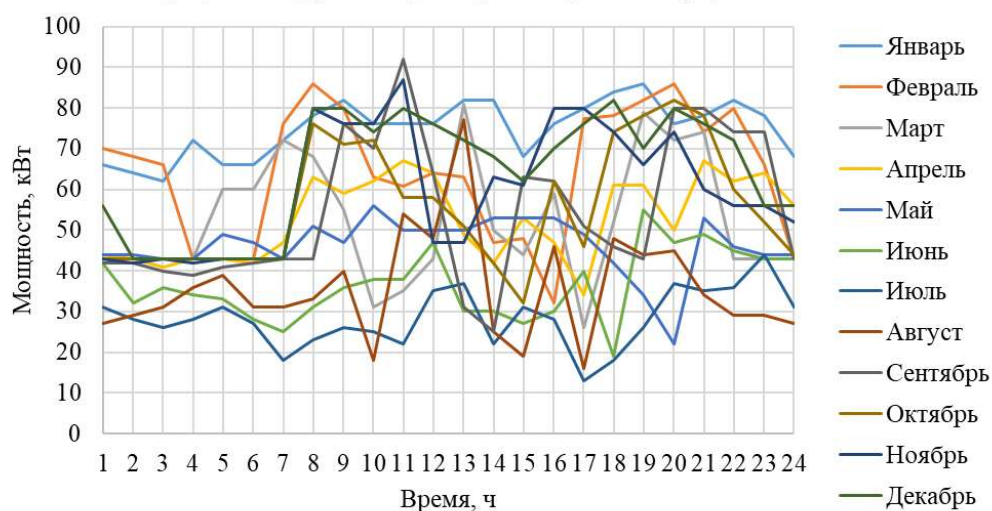


Рисунок А.2 – График нагрузки характерных суток с. Кулун-Елбют

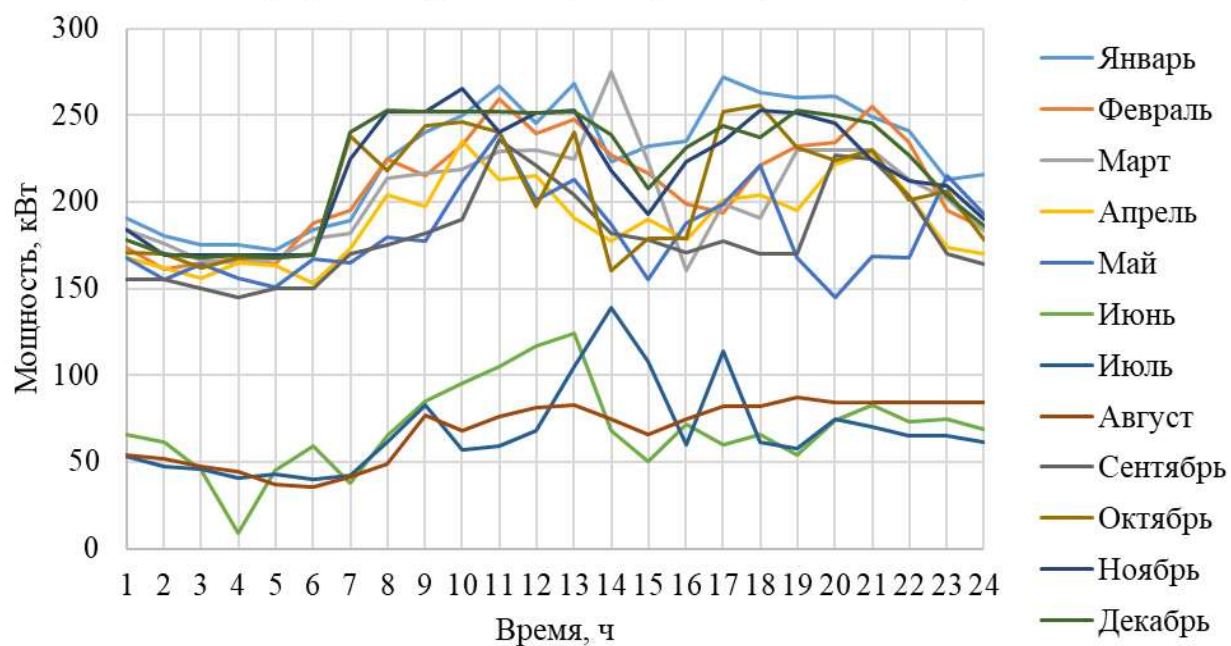


Рисунок А.3 – График нагрузки характерных суток с. Сасыр

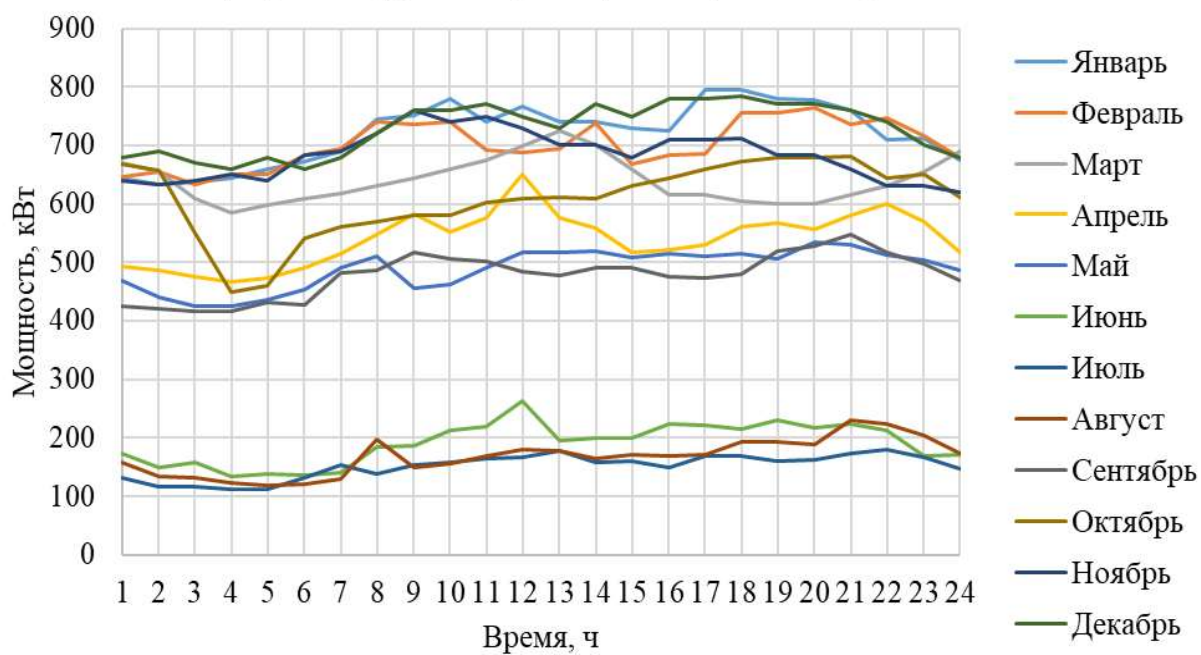


Рисунок А.4 – График нагрузки характерных суток с. Верхоянск

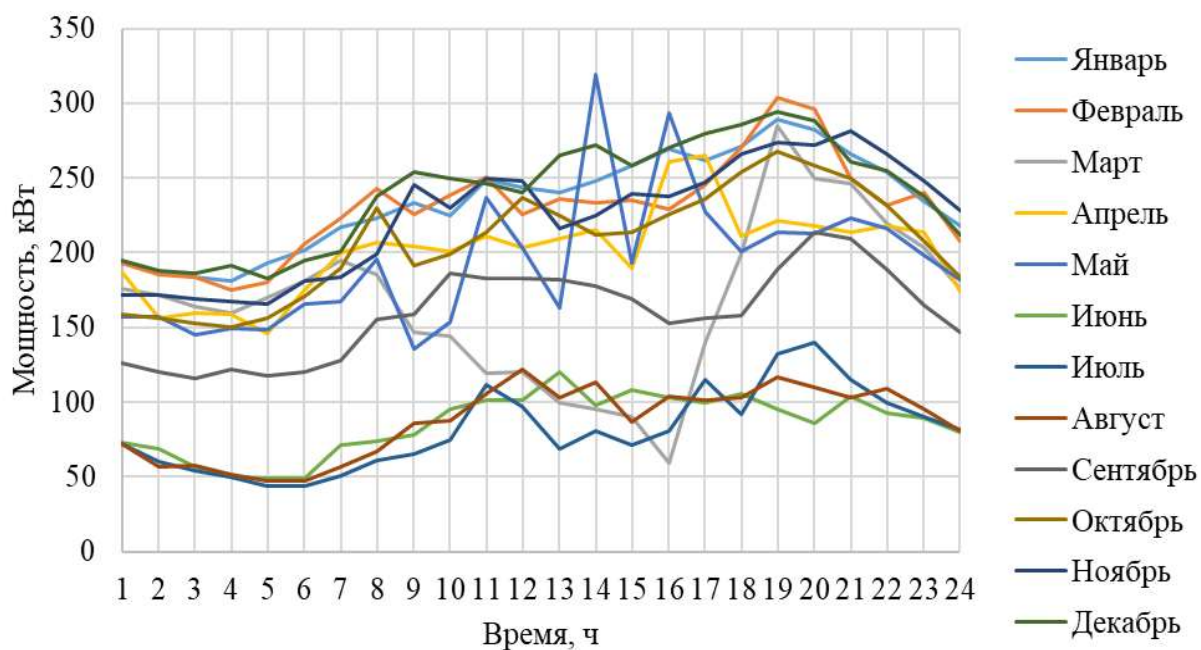


Рисунок А.5 – График нагрузки характерных суток с. Табалах

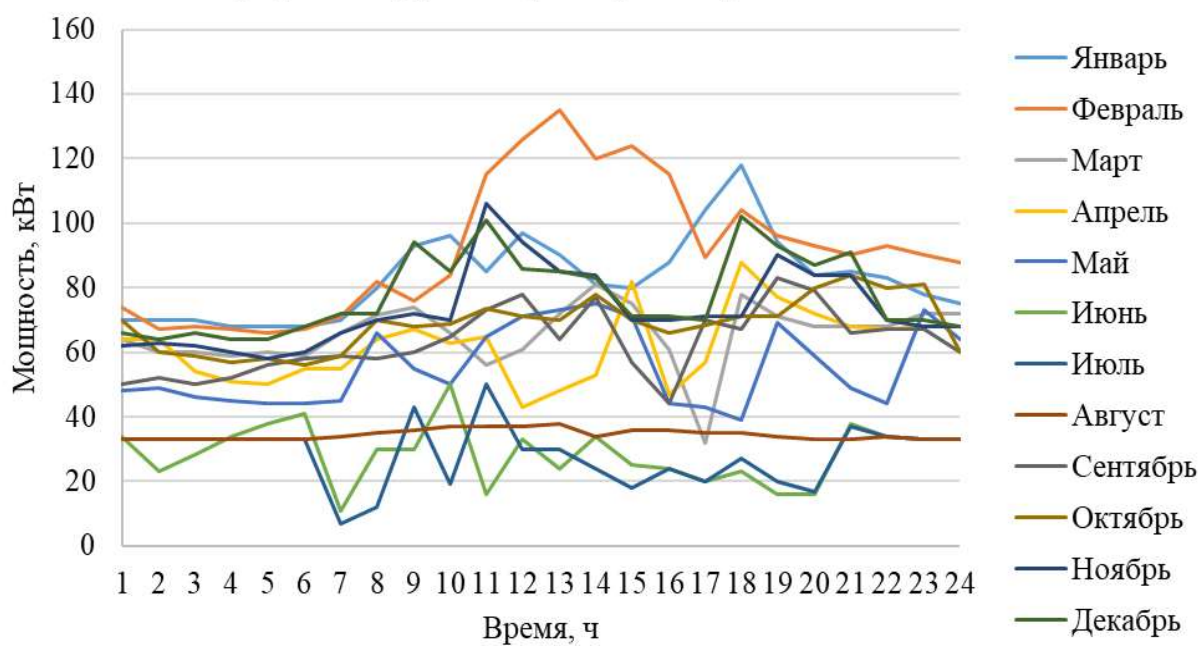


Рисунок А.6 – График нагрузки характерных суток с. Тебюлях

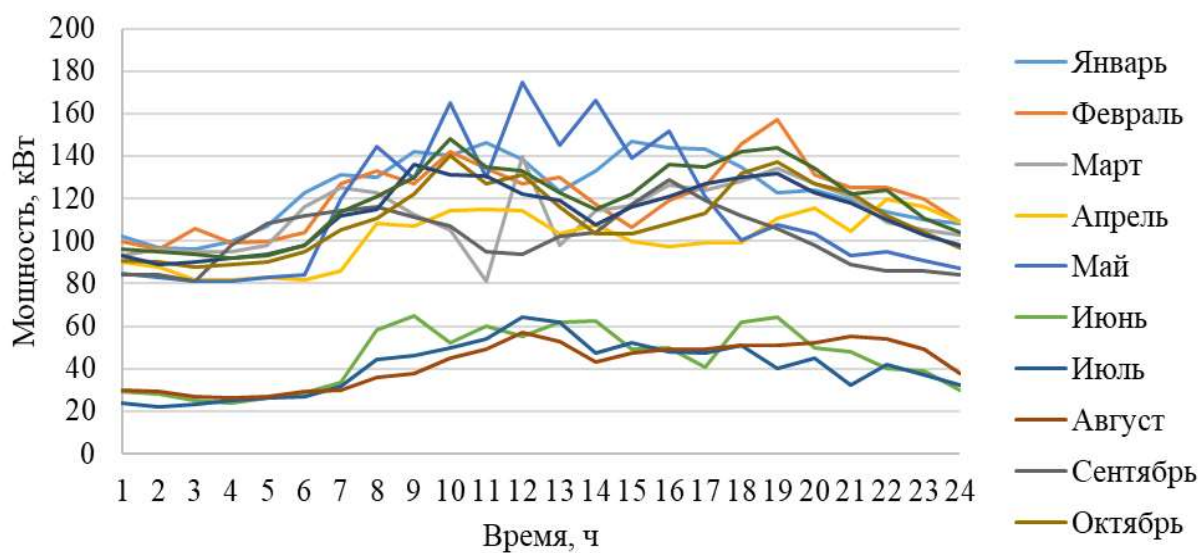


Рисунок А.7 – График нагрузки характерных суток с. Орто-Балагане

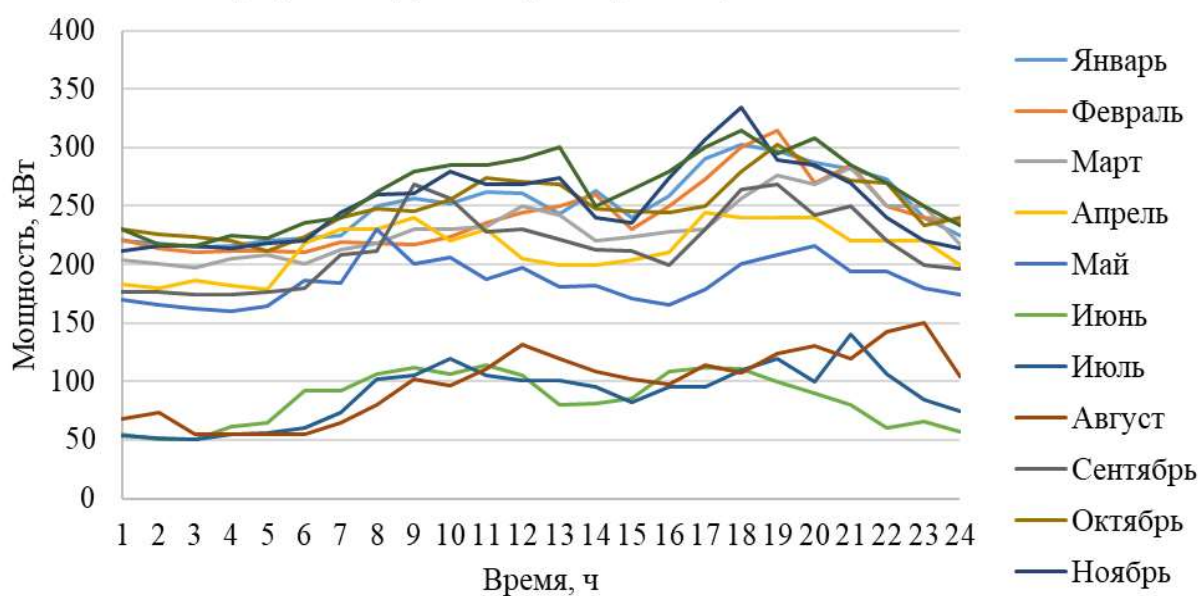


Рисунок А.8 – График нагрузки характерных суток с. Оймякон

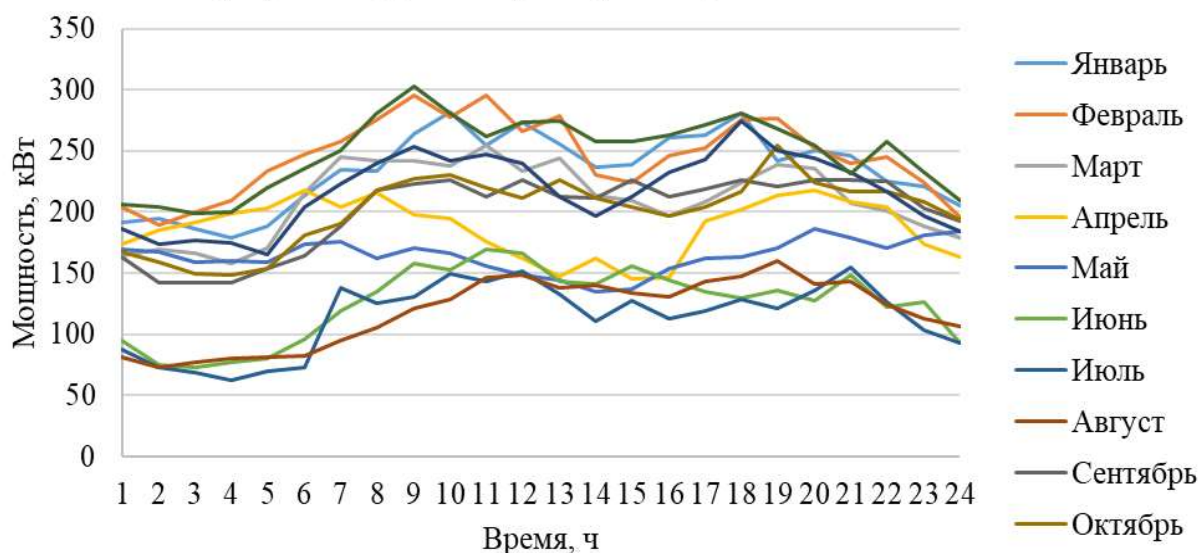


Рисунок А.9 – График нагрузки характерных суток с. Тополиное

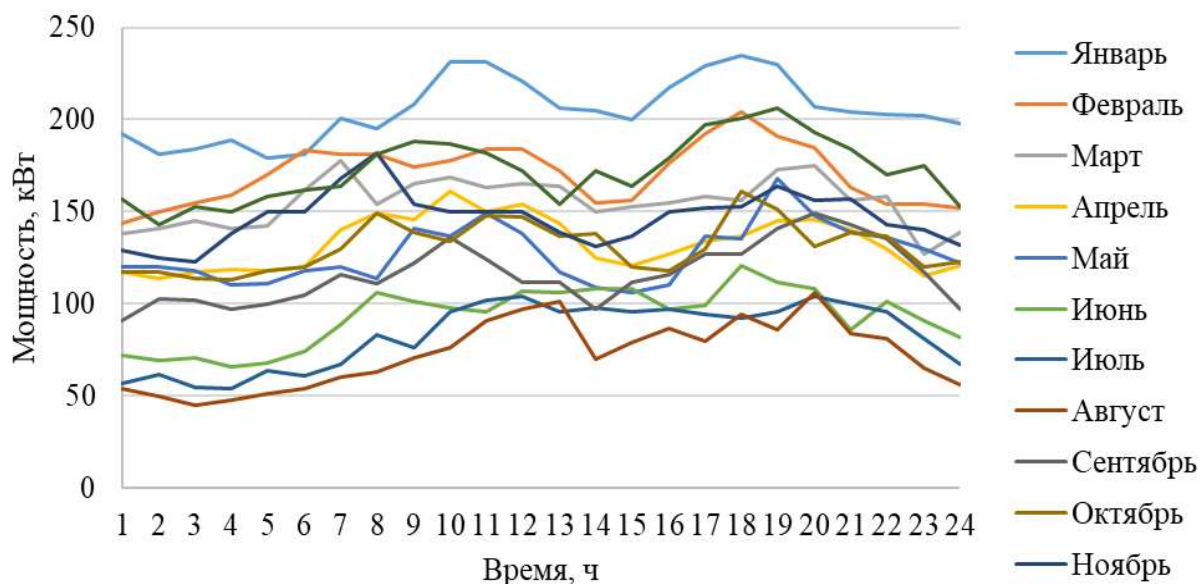


Рисунок А.10 – График нагрузки характерных суток с. Саняхтах

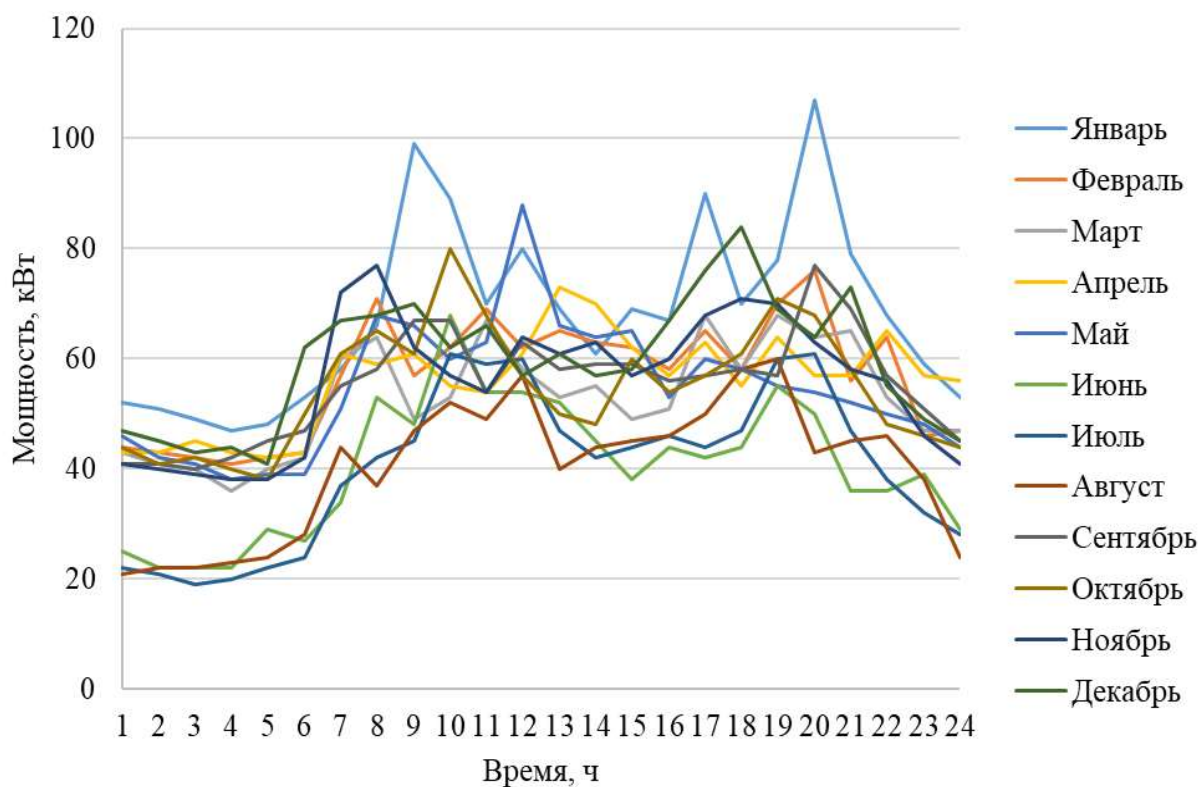


Рисунок А.11 – График нагрузки характерных суток с. Дабан

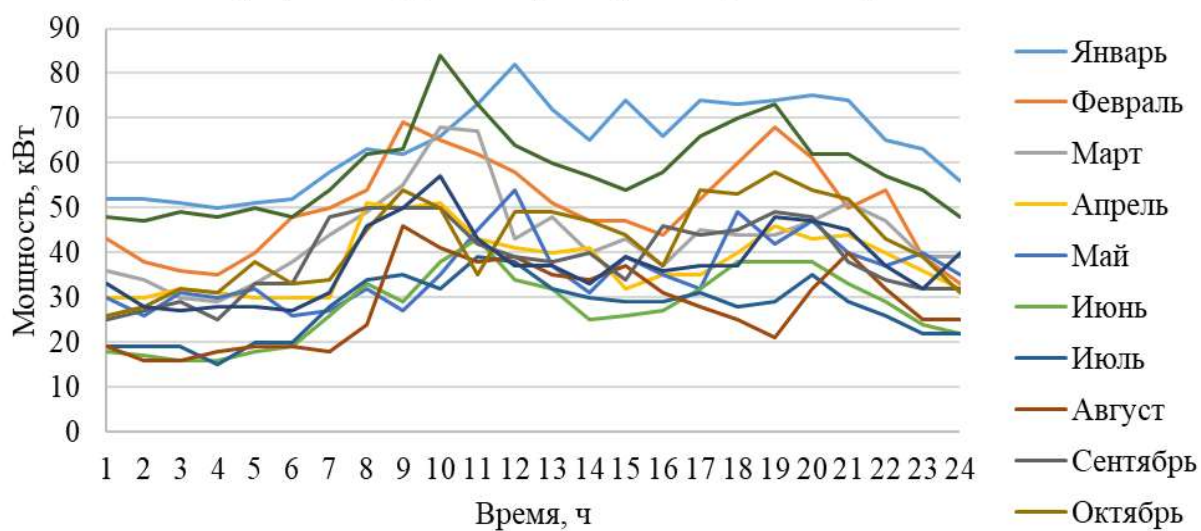


Рисунок А.12 – График нагрузки характерных суток с. Урицкое

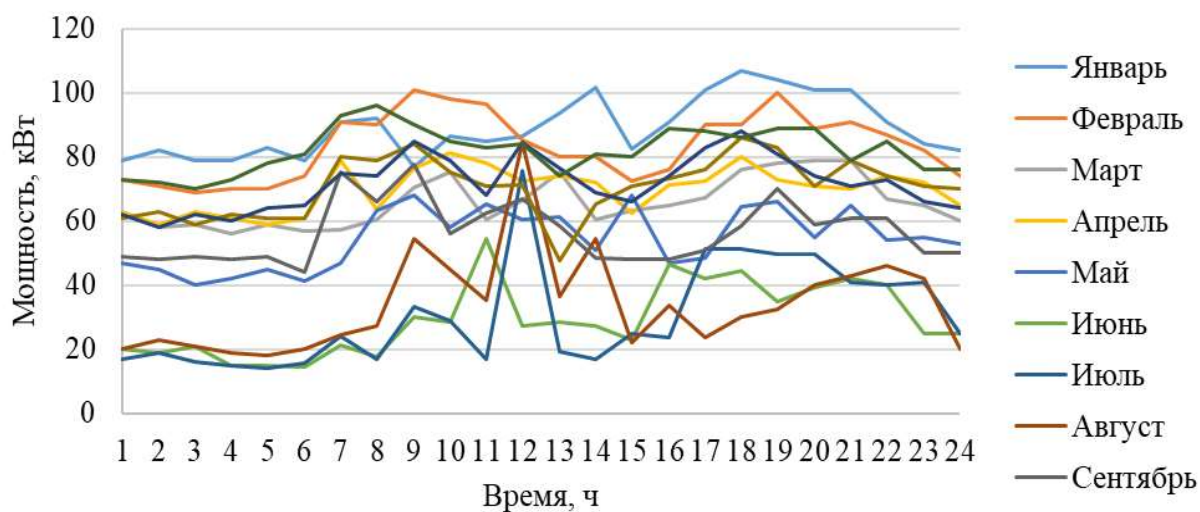


Рисунок А.13 – График нагрузки характерных суток с. Батамай

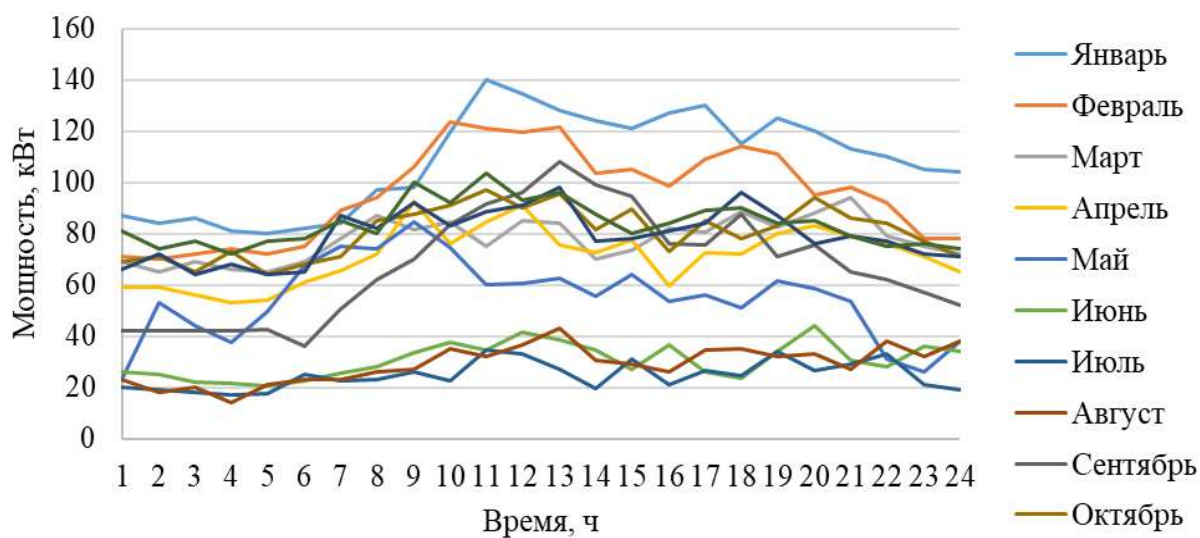


Рисунок А.14 – График нагрузки характерных суток с. Ючюгей

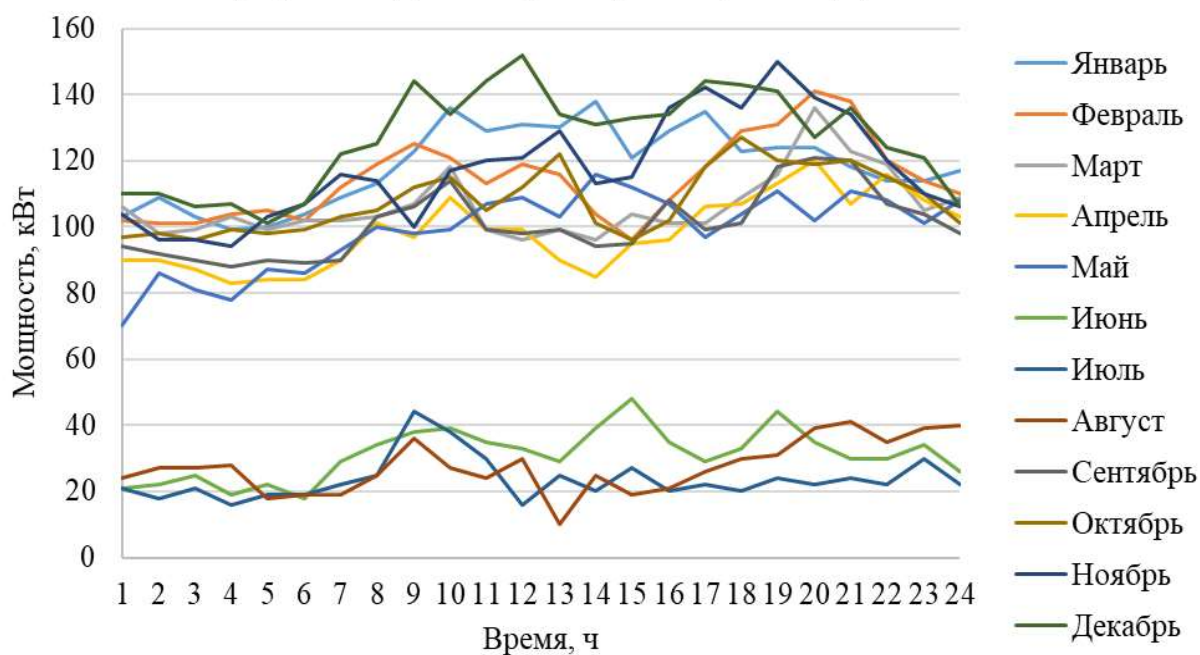


Рисунок А.15 – График нагрузки характерных суток с. Дулгалах

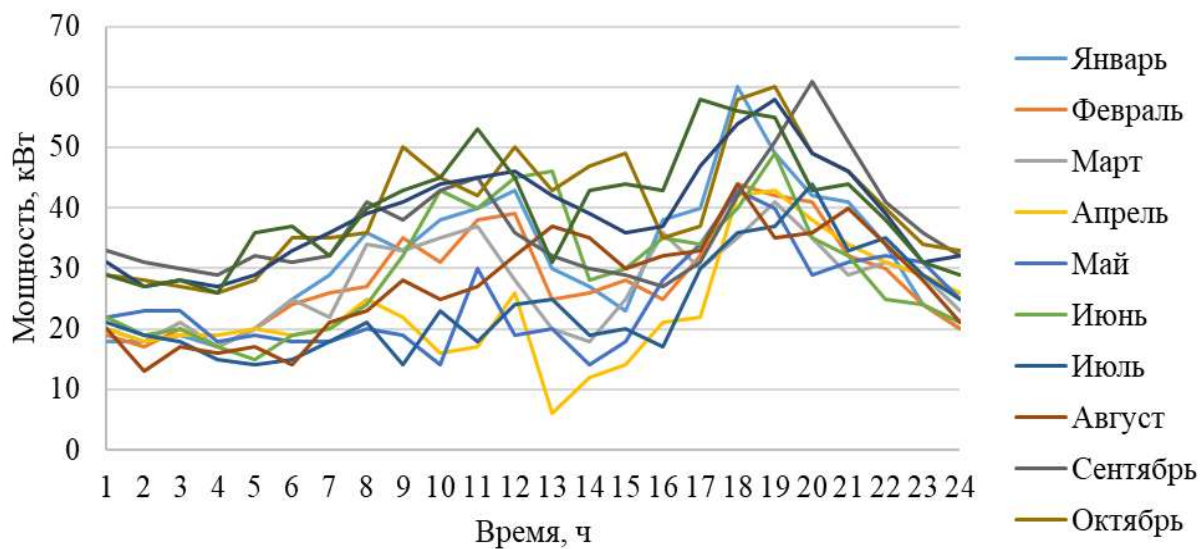


Рисунок А.16 – График нагрузки характерных суток с. Куду-Кюель

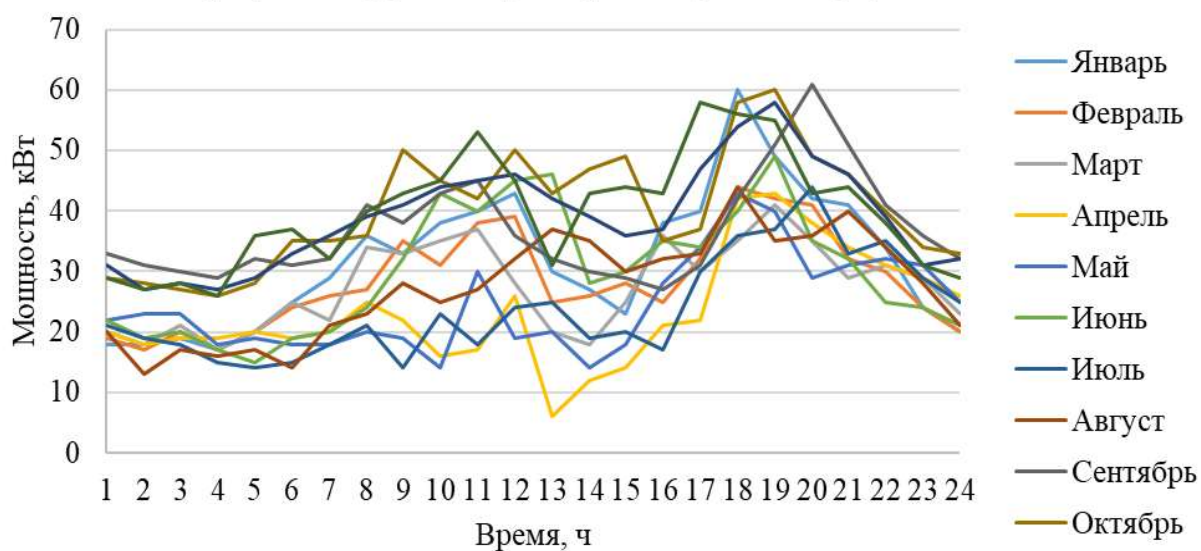


Рисунок А.17 – График нагрузки характерных суток с. Куду-Кюель

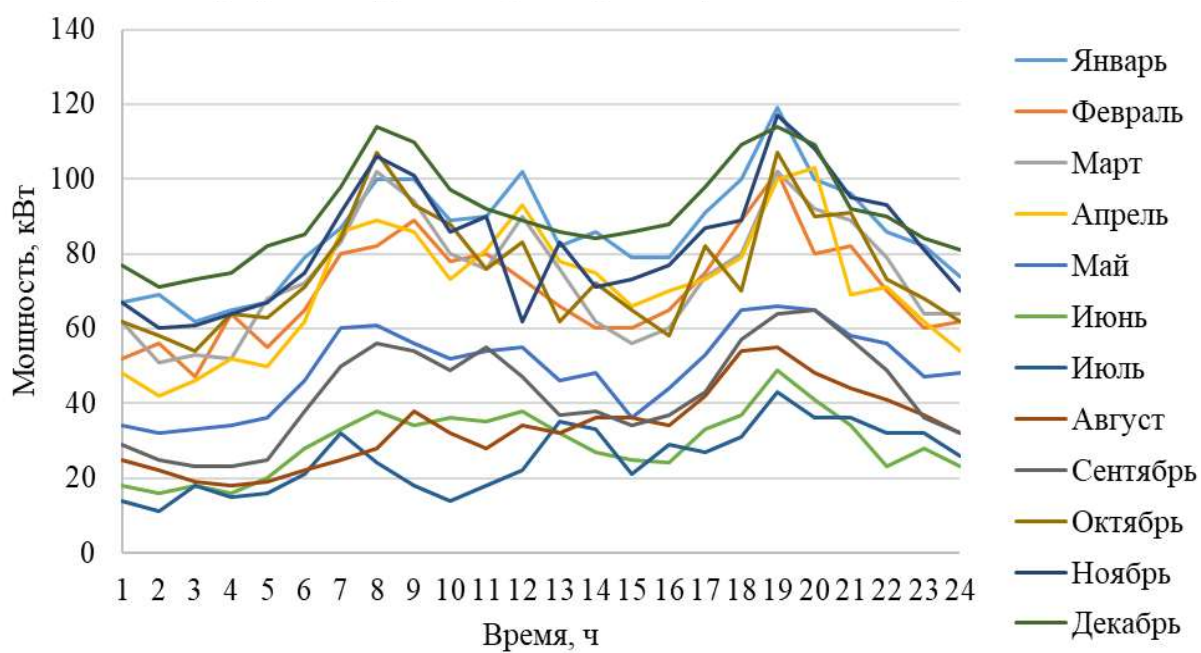


Рисунок А.18 – График нагрузки характерных суток с. Тойон-Ары

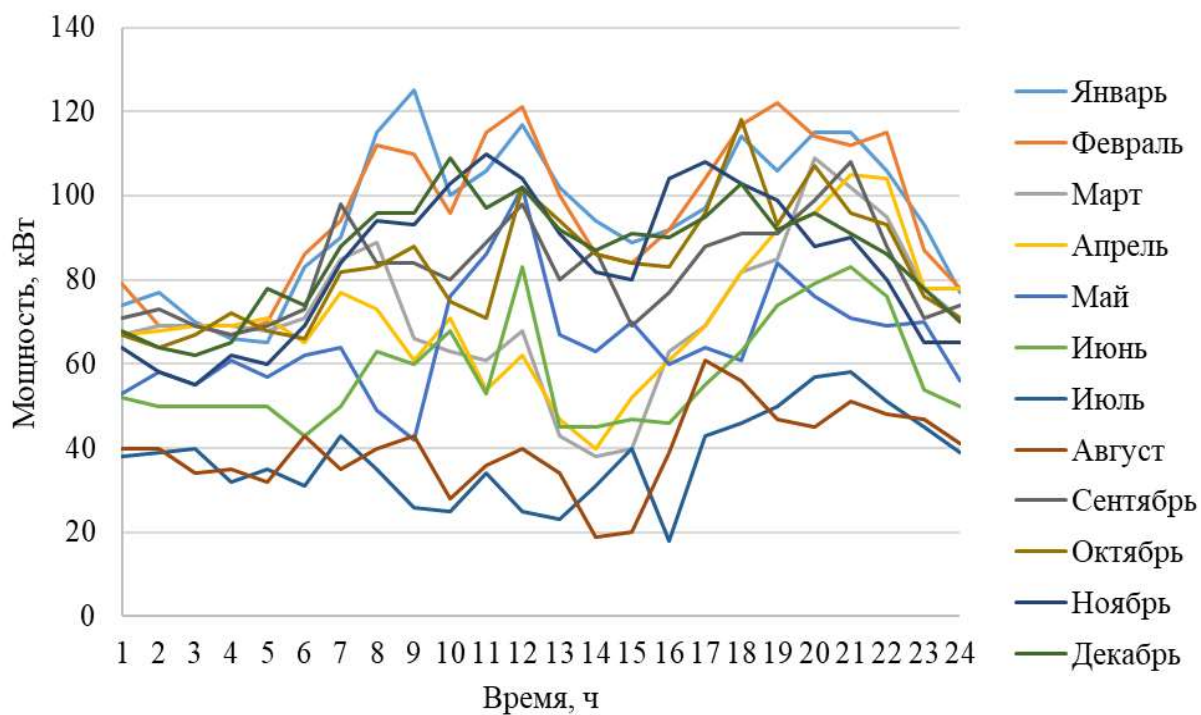


Рисунок А.19 – График нагрузки характерных суток с. Эйик

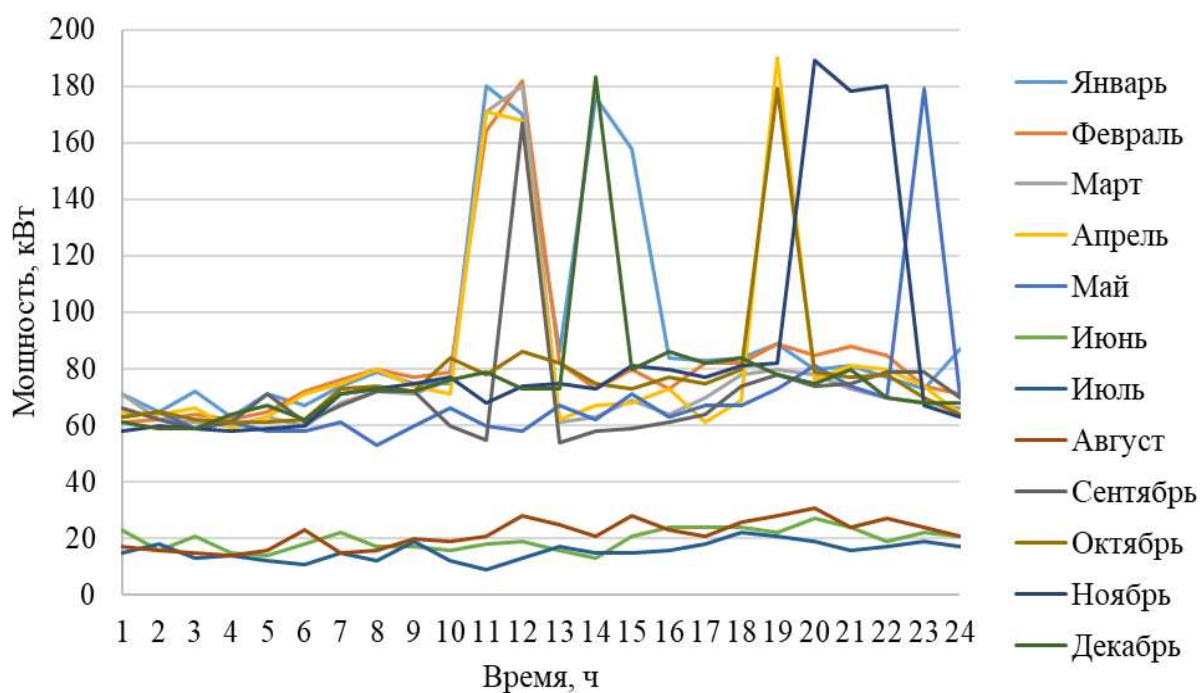


Рисунок А.20 – График нагрузки характерных суток с. Джаргалах

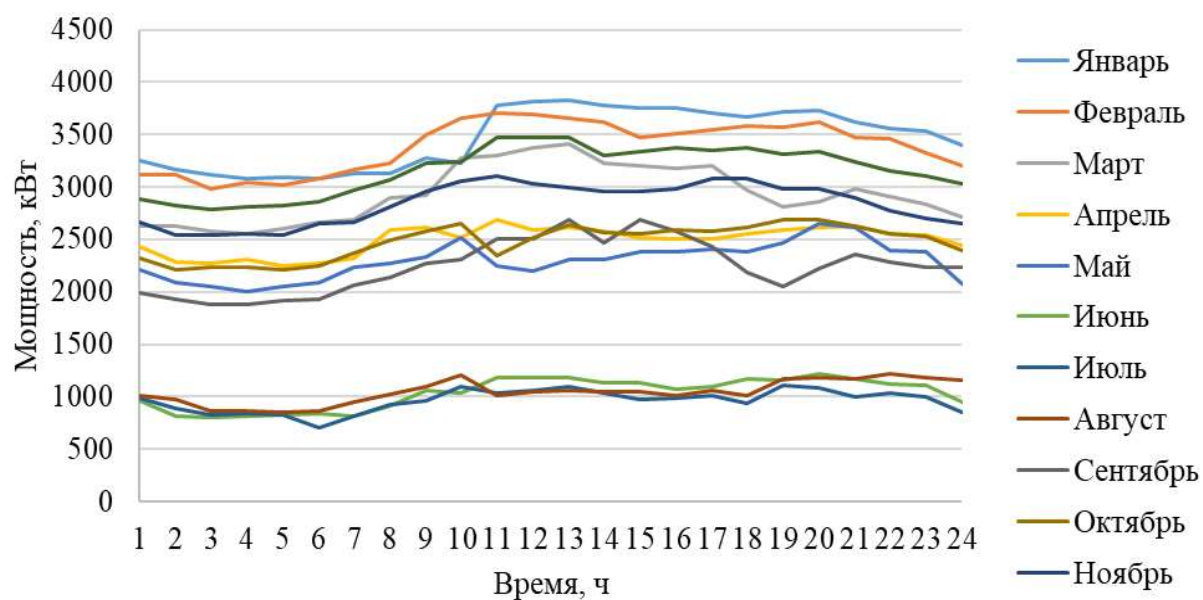


Рисунок А.21 – График нагрузки характерных суток с. Батагай

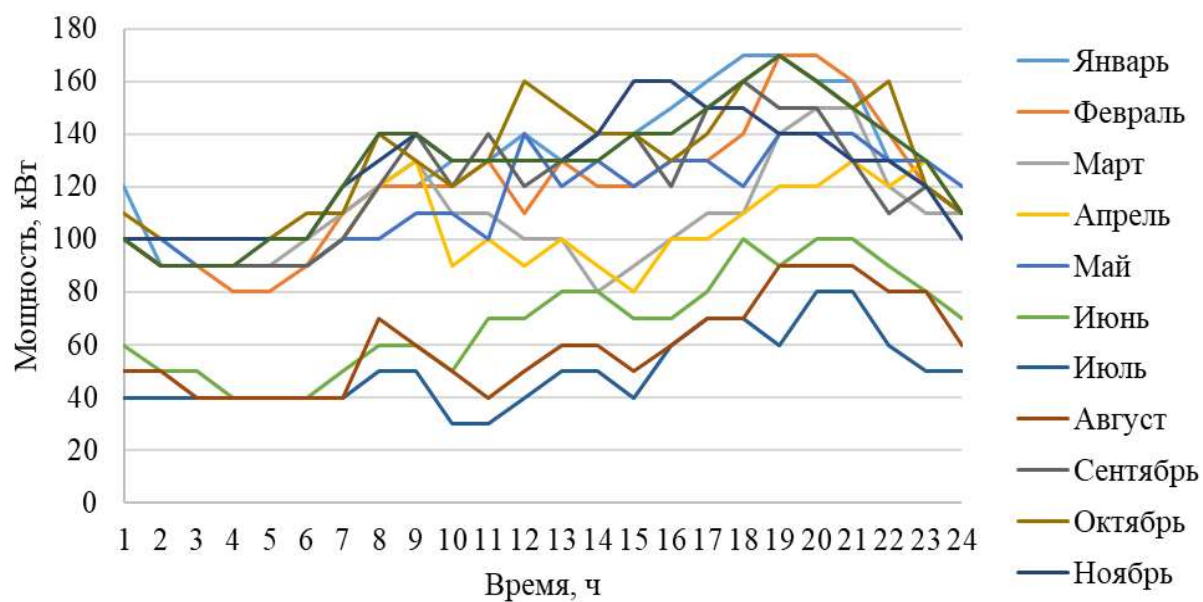


Рисунок А.22 – График нагрузки характерных суток с. Бетенкес

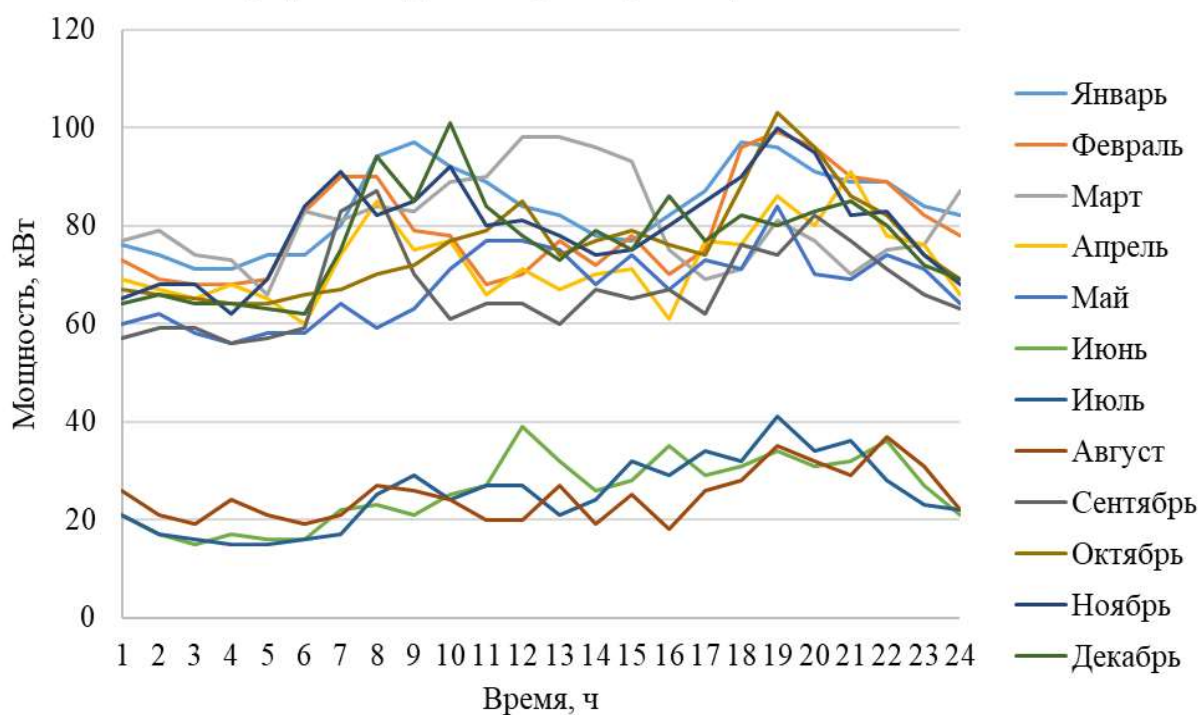


Рисунок А.23 – График нагрузки характерных суток с. Столбы

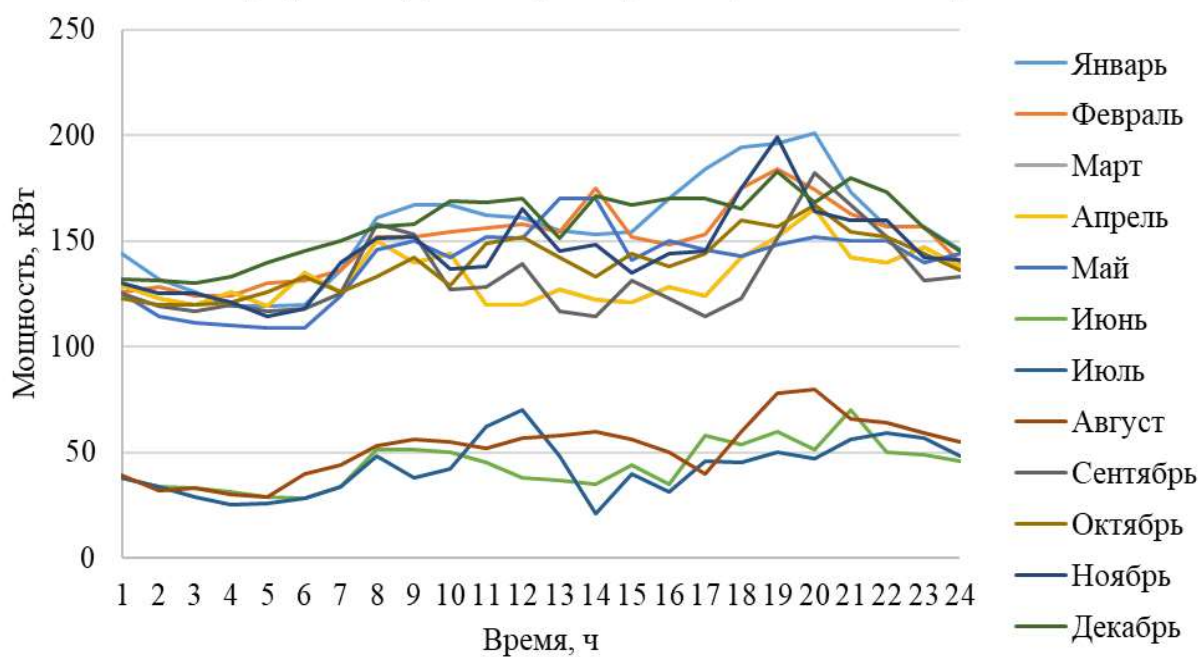


Рисунок А.24 – График нагрузки характерных суток с. Юнкюр

Таблица А.1 – Технические характеристики инверторного оборудования

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
1	Goodwe	GWxxKLV-MT	15			180	800	38	30	150	220	300	40	48	52	1	нет	нет
2	Goodwe	GWxxKLV-MT	21			180	800	38	30	150	220	300	55	48	52	1	нет	нет
3	Goodwe	GWxxKLV-MT	30			180	800	38	30	176	220	242	80	48	52	1	нет	нет
4	Goodwe	GWxxKLV-MT	35			180	800	38	30	176	220	242	96	48	52	1	нет	нет
5	Goodwe	GWxxKLV-MT	30			200	800	42	33		220		80	N/A	N/A	1	нет	нет
6	Goodwe	GWxxKLV-MT	36			200	800	42	33		220		96	N/A	N/A	1	нет	нет
7	Goodwe	GWxxKLV-MT	50			200	800	55	44		220		133	N/A	N/A	1	нет	нет
8	Goodwe	HT	73			200	800	45	30	187	220	242	192	45	55	2	нет	нет
9	Goodwe	GWxx-DNS-30	3			50	600	23	16	196	230	311	14	45	55	1	нет	нет
10	Goodwe	GWxx-DNS-30	4			50	600	23	16	196	230	311	17	45	55	1	нет	нет
11	Goodwe	GWxx-DNS-30	4			50	600	23	16	196	230	311	20	45	55	1	нет	нет
12	Goodwe	GWxx-DNS-30	5			50	600	23	16	196	230	311	24	45	55	1	нет	нет
13	Goodwe	GWxx-DNS-30	6			50	600	23	16	196	230	311	29	45	55	1	нет	нет
14	Goodwe	GWxxK-DNS-G40	3			50	600	23	16	196	230	311	14	45	55	1	нет	нет
15	Goodwe	GWxxK-DNS-G40	4			50	600	23	16	196	230	311	16	45	55	1	нет	нет
16	Goodwe	GWxxK-DNS-G40	4			50	600	23	16	196	230	311	19	45	55	1	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
17	Goodwe	GWxxK-DNS-G40	5			50	600	23	16	196	230	311	23	45	55	1	нет	нет
18	Goodwe	GWxxK-DNS-G40	6			50	600	23	16	196	230	311	27	45	55	1	нет	нет
19	Goodwe	GWxxK-GT	75			200	800	53	42	176	230	245	197	45	55	1	нет	нет
20	Goodwe	GWxxKLV-MT	12			180	800	38	30	150	230	300	32	48	52	1	нет	нет
21	Goodwe	GWxxK-MS-30	5			50	600	25	20	160	230	270	24	45	55	1	нет	нет
22	Goodwe	GWxxK-MS-G40	8			50	600	26	20	160	230	270	34	45	55	1	нет	нет
23	Goodwe	GWxxK-MS-G40	9			50	600	26	20	160	230	270	39	45	55	1	нет	нет
24	Goodwe	GWxxK-MS-G40	10			50	600	26	20	160	230	270	46	45	55	1	нет	нет
25	Goodwe	GWxxK-MS-G40	8			50	600	26	20	160	230	270	36	45	55	1	нет	нет
26	Goodwe	GWxxK-MS-G41	8			50	600	26	20	160	230	270	34	45	55	1	нет	нет
27	Goodwe	GWxxK-SDT-30	10			160	1100	28	22	180	230	280	17	45	55	1	нет	нет
28	Goodwe	GWxxK-SDT-30	12			160	1100	28	22	180	230	280	20	45	55	1	нет	нет
29	Goodwe	GWxxK-SDT-30	15			160	1100	28	22	180	230	280	25	45	55	1	нет	нет
30	Goodwe	GWxxK-SDT-30	17			160	1100	40	32	180	230	280	28	45	55	1	нет	нет
31	Goodwe	GWxxK-SDT-30	20			160	1100	40	32	180	230	280	33	45	55	1	нет	нет
32	Goodwe	GWxxK-SDT-30	25			160	1100	50	40	180	230	260	38	45	55	1	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
33	Goodwe	GWxxK-SDT-30	30			160	1100	53	42	180	230	260	46	45	55	1	нет	нет
34	Goodwe	GWxxK-SDT-C30	50			160	1100	52	40	180	230	280	76	45	55	1	нет	нет
35	Goodwe	GWxxK-SDT-P30	40			160	1100	56	40	180	230	280	61	45	55	1	нет	нет
36	Goodwe	GWxxK-SDT-C30	25			160	1100	53	42	180	230	280	42	45	55	1	нет	нет
37	Goodwe	GWxxK-SDT-C30	30			160	1100	53	42	180	230	280	50	45	55	1	нет	нет
38	Goodwe	GWxxK-SDT-C30	33			160	1100	53	42	180	230	280	50	45	55	1	нет	нет
39	Goodwe	GWxxK-SDT-C30	36			160	1100	53	42	180	230	280	55	45	55	1	нет	нет
40	Goodwe	GWxxK-SDT-C30	40			160	1100	53	42	180	230	280	61	45	55	1	нет	нет
41	Goodwe	GWxxK-SMT	50			180	900	53	42	176	230	246	131	45	55	1	нет	нет
42	Goodwe	GWxx-MIS	2			22	65	25	16	180	230	275	7	45	55	0	нет	нет
43	Goodwe	GWxx-MIS	2			22	65	25	16	180	230	275	8	45	55	0	нет	нет
44	Goodwe	GWxx-MIS	2			22	65	25	16	180	230	275	9	45	55	0	нет	нет
45	Goodwe	GWxx-MS-30	6			50	600	25	20	160	230	270	29	45	55	1	нет	нет
46	Goodwe	GWxx-MS-30	7			50	600	25	20	160	230	270	34	45	55	1	нет	нет
47	Goodwe	GWxx-MS-30	9			50	600	25	20	160	230	270	41	45	55	1	нет	нет
48	Goodwe	GWxx-MS-30	10			50	600	25	20	160	230	270	44	45	55	1	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
49	Goodwe	GWxx-SDT-30	4			160	1100	28	22	180	230	280	7	45	55	1	нет	нет
50	Goodwe	GWxx-SDT-30	5			160	1100	28	22	180	230	280	8	45	55	1	нет	нет
51	Goodwe	GWxx-SDT-30	6			160	1100	28	22	180	230	280	10	45	55	1	нет	нет
52	Goodwe	GWxx-SDT-30	8			160	1100	28	22	180	230	280	13	45	55	1	нет	нет
53	Goodwe	GWxx-XS-30	1			50	600	25	16	154	230	288	3	45	55	3	нет	нет
54	Goodwe	GWxx-XS-30	1			50	600	25	16	154	230	288	5	45	55	3	нет	нет
55	Goodwe	GWxx-XS-30	2			50	600	25	16	154	230	288	7	45	55	3	нет	нет
56	Goodwe	GWxx-XS-30	2			50	600	25	16	154	230	288	9	45	55	3	нет	нет
57	Goodwe	GWxx-XS-30	3			50	600	25	16	154	230	288	11	45	55	3	нет	нет
58	Goodwe	GWxx-XS-30	3			50	600	25	16	154	230	288	14	45	55	3	нет	нет
59	Goodwe	GWxx-XS-30	3			50	600	25	16	154	230	288	15	45	55	3	нет	нет
60	Goodwe	GWxxK-GT	100			200	1100	53	42	304	380	460	167	45	55	2	нет	нет
61	Goodwe	GWxxK-GT	110			200	1100	53	42	304	380	460	183	45	55	2	нет	нет
62	Goodwe	GWxxK-GT	125			200	1100	53	42	304	380	460	199	45	55	2	нет	нет
63	Goodwe	HT	75			200	1100	45	30	320	380	440	125	45	55	2	нет	нет
64	Goodwe	HT	80			200	1100	45	30	320	380	440	134	45	55	2	нет	нет
65	Goodwe	GWxxK-MT	25			180	1100	38	30	320	400	460	40	48	52	1	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частот а, Гц	Макс. вых. частот а, Гц	Собств . нужды , Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
66	Goodwe	GWxxK-MT	30			180	1100	38	30	320	400	460	43	48	52	1	нет	нет
67	Goodwe	GWxxK-MT	30			180	1100	38	30	320	400	460	48	48	52	1	нет	нет
68	Goodwe	GWxxK-MT	36			180	1100	38	30	320	400	460	53	48	52	1	нет	нет
69	Goodwe	GWxxKS-MT	50			180	1100	38	30	320	400	460	80	45	55	1	нет	нет
70	Goodwe	GWxxKS-MT	60			180	1100	38	30	320	400	460	96	45	55	1	нет	нет
71	Goodwe	GWxxK-SMT	80			180	1100	53	42	323	400	457	128	45	55	1	нет	нет
72	Goodwe	HT	100			200	1100	45	30	320	400	440	167	45	55	2	нет	нет
73	Goodwe	HT	110			200	1100	45	30	320	400	440	176	45	55	2	нет	нет
74	Goodwe	HT	120			200	1100	45	30	320	400	440	191	45	55	2	нет	нет
75	Goodwe	HT	136			200	1100	45	30		500		173	45	55	2	нет	нет
76	Goodwe	GWxxK-UT	320			500	1500	50	30	640	800	920	254	45	55	3	нет	нет
77	Goodwe	GWxxK-UT	320			500	1500	60	40	640	800	920	254	45	55	3	нет	нет
78	Goodwe	GWxxK-UT	352			500	1500	50	15	640	800	920	254	45	55	3	нет	нет
79	Goodwe	GWxxK-UT	352			500	1500	60	12	640	800	920	254	45	55	3	нет	нет
80	Goodwe	HT	225			550	1500	50	30	640	800	920	179	45	55	18	нет	нет
81	Goodwe	HT	250			550	1500	50	30	640	800	920	181	45	55	18	нет	нет
82	Goodwe	HT	225			550	1500	90	60	640	800	920	179	45	55	18	нет	нет
83	Goodwe	HT	250			550	1500	90	60	640	800	920	181	45	55	18	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
84	Goodwe	GWxx-ES-20	3			58	600	23	16	170	230	280	14	45	55	10	нет	нет
85	Goodwe	GWxx-ES-20	4	5		58	600	23	16	170	230	280	17	45	55	10	нет	нет
86	Goodwe	GWxx-ES-20	4	5		58	600	23	16	170	230	280	17	45	55	10	нет	нет
87	Goodwe	GWxx-ES-20	5	8		58	600	23	16	170	230	280	23	45	55	10	нет	нет
88	Goodwe	GWxx-ES-20	5	8		58	600	23	16	170	230	280	23	45	55	10	нет	нет
89	Goodwe	GWxx-ES-20	6	9		58	600	23	16	170	230	280	27	45	55	10	нет	нет
90	Goodwe	GWxx-ES-20	6	9		58	600	23	16	170	230	280	27	45	55	10	нет	нет
91	Goodwe	GWxx-ES-C10	3	6		58	600	26	20	170	230	280	15	45	55		нет	нет
92	Goodwe	GWxx-ES-C10	4	7		58	600	26	20	170	230	280	18	45	55		нет	нет
93	Goodwe	GWxx-ES-C10	5	10		58	600	26	20	170	230	280	25	45	55		нет	нет
94	Goodwe	GWxx-ES-C10	6	12		58	600	26	20	170	230	280	30	45	55		нет	нет
95	Goodwe	GWxx-ES-C10	8	16		58	600	48	32	170	230	280	40	45	55		нет	нет
96	Goodwe	GWxx-ES-C10	10	20		58	600	48	32	170	230	280	50	45	55		нет	нет
97	Goodwe	GWxx-ES-C10	12	24		58	600	48	32	170	230	280	60	45	55		нет	нет
98	Goodwe	GWxxN-EH	4	5		85	580	21	16		230		16	N/A	N/A	10	нет	нет
99	Goodwe	GWxxN-EH	5	8		85	580	21	16		230		16	N/A	N/A	10	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
100	Goodwe	GWxxN-EN	6	9		85	580	21	16		230		16	N/A	N/A	10	нет	нет
101	Goodwe	GWxxK-ET	15	23		200	1000	38	30	0	380	300	24	45	65	15	нет	нет
102	Goodwe	GWxxK-ET	20	30		200	1000	38	30	0	380	300	32	45	65	15	нет	нет
103	Goodwe	GWxxK-ET	25	38		200	1000	38	30	0	380	300	40	45	65	15	нет	нет
104	Goodwe	GWxxK-ET	30	45		200	1000	38	30	0	380	300	43	45	65	15	нет	нет
105	Goodwe	GWxxK-ET	30	45		200	1000	38	30	0	380	300	48	45	65	15	нет	нет
106	Goodwe	GWxxK-ET-10	40			200	1000	152	116	176	380	276	61	45	65	15	нет	нет
107	Goodwe	GWxx-ET-20	6	10		150	1000	24	16	170	400	290	9	45	65		нет	нет
108	Goodwe	GWxx-ET-20	8	13		150	1000	24	16	170	400	290	9	45	65		нет	нет
109	Goodwe	GWxx-ET-20	10	16		150	1000	24	16	170	400	290	9	45	65		нет	нет
110	Goodwe	GWxx-ET-20	12	19		150	1000	24	16	170	400	290	9	45	65		нет	нет
111	Goodwe	GWxx-ET-20	15	24		150	1000	24	16	170	400	290	9	45	65		нет	нет
112	Goodwe	GWxxKxx-ETC	50	65		250	1000	125	100	312	400	460	80	47	52		нет	нет
113	Goodwe	GWxxKxx-ETC	50	65		250	1000	125	100	312	400	460	80	47	52		нет	нет
114	Goodwe	GWxxKxx-ETC	100	130		250	1000	125	100	312	400	460	80	47	52		нет	нет
115	Goodwe	GWxxKxx-ETC	100	130		250	1000	125	100	312	400	460	80	47	52		нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
116	Goodwe	GWxx-SBP-20	4		40	48	60		75		230		17	N/A	N/A	10	нет	нет
117	Goodwe	GWxx-SBP-20	5		40	48	60		75		230		23	N/A	N/A	10	нет	нет
118	Goodwe	GWxx-SBP-20	6		40	48	60		75		230		27	N/A	N/A	10	нет	нет
119	Goodwe	GWxxKxx-BTC	50		200	200	865		100	312	400	460	80	47	52		нет	нет
120	Goodwe	GWxxKxx-BTC	50		200	200	865		100	312	400	460	80	47	52		нет	нет
121	Goodwe	GWxxKxx-BTC	100		200	200	865		100	312	400	460	80	47	52		нет	нет
122	Goodwe	GWxxKxx-BTC	100		200	200	865		100	312	400	460	80	47	52		нет	нет
123	Kehua	SPIxxK-BX2	8			180	1100		15		400		13	45	55	1	нет	11,60
124	Kehua	SPIxxK-BX2	10			180	1100		15		400		16	45	55	1	нет	14,50
125	Kehua	SPIxxK-BX2	12			180	1100		15		400		19	45	55	1	нет	17,40
126	Kehua	SPIxxK-BX2	15			180	1100		30		400		24	45	55	1	нет	21,70
127	Kehua	SPIxxK-BX2	17			180	1100		30		400		27	45	55	1	нет	24,50
128	Kehua	SPIxxK-BX2	20			180	1100		30		400		32	45	55	1	нет	28,90
129	Kehua	SPIxx-BX2	7	11		80	600		15		220		34	45	55	1	нет	30,40
130	Kehua	SPIxxK-BX2	23			180	1100		30		400		37	45	55	1	нет	33,20
131	Kehua	SPIxx-BX2	8	12		80	600		15		220		38	45	55	1	нет	34,70

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
132	Kehua	SPIxxK-B X2	25			180	1100		30		400		40	45	55	1	нет	36,10
133	Kehua	SPIxx-B X2	9	14		80	600		15		220		39	45	55	1	нет	39,10
134	Kehua	SPIxxK-B X2	30			180	1100		30		400		48	45	55	1	нет	43,20
135	Kehua	SPIxx-B X2	10	15		80	600		16		220		44	45	55	1	нет	43,50
136	Kehua	SPIxxK-B X2	33			180	1100		30		400		52	45	55	1	нет	47,60
137	Kehua	SPIxxK-B X2	36			180	1100		30		400		57	45	55	1	нет	52,00
138	Kehua	SPIxxK-B X2	50			180	1100	50	40		400		79	45	55	1	нет	72,20
139	Kehua	SPIxxK-B X2	60			180	1100	50	40		400		95	45	55	1	нет	86,60
140	Kehua	SPIxxK-B	100			250	1100		30		400		159	45	55	2	нет	144,30
141	Kehua	SPIxxK-B X2	100			250	1100		30		400		159	45	55	2	нет	144,30
142	Kehua	SPIxxK-B	110			250	1100		30		400		175	45	55	2	нет	158,80
143	Kehua	SPIxxK-B X2	110			250	1100		30		400		175	45	55	2	нет	158,80
144	Kehua	SPIxxK-B	125			250	1100		30		400		199	45	55	2	нет	180,40
145	Kehua	SPIxxK-B X2	125			250	1100		30		400		199	45	55	2	нет	180,40
146	Kehua	SPIxxK-B-H	250			550	1500		30		800		180	45	55	2	нет	180,40
147	Kehua	SPIxxK-B-H X2	250			550	1500		30		800		180	45	55	2	нет	180,40
148	Kehua	SPIxxK-B-H X2P	250			550	1500		60		800		180	45	55	2	нет	180,40

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
149	Kehua	SPIxxK-B-H/H1	300			550	1500		40		800		238	45	55	3	нет	216,50
150	Kehua	SPIxxK-B-H/H1	300			550	1500		30		800		238	45	55	3	нет	216,50
151	Kehua	SPIxxK-B-H/H1	320			550	1500		40		800		254	45	55	3	нет	230,90
152	Kehua	SPIxxK-B-H/H1	320			550	1500		30		800		254	45	55	3	нет	230,90
153	Kehua	SPIxxK-B-H/H1	350			550	1500		40		800		256	45	55	3	нет	252,60
154	Kehua	SPIxxK-B-H/H1	350			550	1500		30		800		256	45	55	3	нет	252,60
155	Kehua	iStoragE1xx	4	9	100	120	500	19	15	180	230	270	16	45	55		нет	нет
156	Kehua	iStoragE1xx	5	9		120	580	19	15	180	230	270	16	45	55		нет	нет
157	Kehua	iStoragE1xx	6	9		120	580	19	15	180	230	270	16	45	55		нет	нет
158	Kehua	iStoragE3xxK	5			200	1000	20	16	323	380	418	8	45	55		нет	нет
159	Kehua	iStoragE3xxK	6	23		200	1000	20	16	323	380	418	10	45	55		нет	нет
160	Kehua	iStoragE3xxK	8	29		200	1000	20	16	323	380	418	13	45	55		нет	нет
161	Kehua	iStoragE3xxK	10	29		200	1000	20	16	323	380	418	16	45	55		нет	нет
162	Kehua	iStoragE3xxK	12	29		200	1000	20	16	323	380	418	17	45	55		нет	нет
163	Kehua	BCSxxK-A	100		500		1000		228	340	400	440	159	N/A	N/A		нет	нет
164	Kehua	BCSxxK-A	250		500		1000		566	340	400	440	397	N/A	N/A		нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
165	Kehua	BCSxxK-A	500		500		1000		1125	340	400	440	794	N/A	N/A		нет	нет
166	Kehua	BCSxxK-B-HM X2	100		600		1000		187	340	400	440	158	N/A	N/A		45	нет
167	Kehua	BCSxxK-B-HM X2	200		1060		1500		212	587	690	759	184	N/A	N/A		40	нет
168	Kehua	BCSxxK-B-HUD	1250		1000		1500		1403	587	690	759	1151	N/A	N/A		нет	нет
169	Kehua	BCSxxK-B-HUD	2500		1000		1500		2806	621	690	759	2301	N/A	N/A		нет	нет
170	Kehua	BCSxxK-B-HUD	1500		1000		1500		1683	587	690	759	1381	N/A	N/A		нет	нет
171	Kehua	BCSxxK-B-HUD	1725		1000		1500		1936	587	690	759	1588	N/A	N/A		нет	нет
172	Kehua	BCSxxK-C-HUD-US	1000		1060		1500		1122	587	690	759	920	N/A	N/A		нет	нет
173	Kehua	BCSxxK-C-HUD-US	1250		1000		1500		1403	587	690	759	1151	N/A	N/A		нет	нет
174	Kstar	GSMxxD	2500		860	940	1500		4009	510	600	660	2646	45	55	250	нет	2406,0
175	Kstar	GSMxxD	3125		860	940	1500		4009	510	600	660	3308	45	55	250	нет	3007,0
176	Kstar	GxxKTH	350			500	1500	60	40		800		255	45	55		нет	нет
177	Kstar	GxxKTHC	350			500	1500	45	30		800		254	45	55		нет	нет
178	Kstar	KSG-xxUH-M0	250			650	1500	50	30		800		180	45	55		30	нет
179	Kstar	GSMxxD-MV	2500		860	940	1500		3207	10000		35000	2750	45	55		нет	нет
180	Kstar	GSMxxD-MV	3125		860	940	1500		4009	10		35	3308	45	55		нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
181	Kstar	GSMxxD-MV	5000		860	940	1500		5293	10		35	5293	45	55		нет	нет
182	Kstar	GSMxxD-MV	6250		860	940	1500		6616	10		35	6616	45	55		нет	нет
183	Kstar	КАСxxDP	50				1000		108	340	400	440	80	45	55		нет	нет
184	Kstar	GSE-T	50		400		1000		142	320	400	460	80	48	52		нет	80,00
185	Kstar	GSE-T	100		400		1000		283	320	400	460	160	48	52		нет	80,00
186	Kstar	GSE-T	150		500		1000		340	320	400	460	240	48	52		нет	80,00
187	Kstar	GSE-T	250		500		1000		565	320	400	460	400	48	52		нет	80,00
188	Kstar	GSE-T	500		500		1000		1128	320	400	460	794	48	52		нет	80,00
189	SMA	Sunny Tripower	3	6	125	175	850	18	12	180	230	280	5	45	55	5	нет	4,40
190	SMA	Sunny Tripower	4	8	125	175	850	18	12	180	230	280	6	45	55	5	нет	5,80
191	SMA	Sunny Tripower	5	9	125	175	850	18	12	180	230	280	8	45	55	5	нет	7,30
192	SMA	Sunny Tripower	6	9	125	175	850	18	12	180	230	280	9	45	55	5	нет	8,70
193	SMA	Sunny Tripower	8	15	125	175	1000	30	20	180	230	280	12	45	55	5	нет	11,60
194	SMA	Sunny Boy	3	6	110	125	600	20	15	180	230	280	14	45	55	5	нет	13,10
195	SMA	Sunny Tripower	10	15	125	175	1000	30	20	180	230	280	15	45	55	5	нет	14,50
196	SMA	Sunny Boy	4	6	110	125	600	20	15	180	230	280	16	45	55	5	нет	16,00
197	SMA	Sunny Boy	4	8	110	125	600	20	15	180	230	280	18	45	55	5	нет	17,40
198	SMA	Sunny Tripower X	12		150	188	1000	38	24	176	230	275	20	44	56	5	нет	17,40

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частот а, Гц	Макс. вых. частот а, Гц	Собств . нужды , Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
199	SMA	Sunny Tripower X	15	23	150	188	1000	38	24	176	230	275	25	44	56	5	нет	21,70
200	SMA	Sunny Boy	5	8	110	125	600	20	15	180	230	280	23	45	55	5	нет	22,00
201	SMA	Sunny Boy	6	9	110	125	600	20	15	180	230	280	26	45	55	5	нет	26,10
202	SMA	Sunny Tripower X	20	30	150	188	1000	38	24	176	230	275	37	44	56	5	нет	29,00
203	SMA	Sunny Tripower X	25	38	150	188	1000	38	24	176	230	275	37	44	56	5	нет	36,20
204	SMA	Sunny Tripower Core 2	110	165	200	250	1100	40	26	320	400	460	159	45	55	5	нет	158,80
205	SMA	Sunny Tripower 125	125	188	180	200	1100	40	30	320	400	480	181	45	65		нет	181,10
206	SMA	Sunny Central UP	2667		849	1030	1500	8400	3200	480	600	720		47	53	370	35	2566,0
207	SMA	Sunny Central UP	2800		891	1071	1500	8400	3200	504	630	756		47	53	370	35	2566,0
208	SMA	Sunny Central UP	2933		934	1112	1500	8400	3200	528	660	792		47	53	370	35	2566,0
209	SMA	Sunny Central UP	3067		976	1153	1500	8400	3200	552	690	828		47	53	370	35	2566,0
210	SMA	Sunny Central UP	4000		849	1030	1500	8400	4750	480	600	720		47	53	370	35	3850,0
211	SMA	Sunny Central UP	4200		891	1071	1500	8400	4750	504	630	756		47	53	370	35	3850,0
212	SMA	Sunny Central UP	4400		934	1112	1500	8400	4750	528	660	792		47	53	370	35	3850,0

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
213	SMA	Sunny Central UP	4600		976	1153	1500	8400	4750	552	690	828		47	53	370	35	3850,0
214	SMA	Sunny Highpower PEAK3	100	200	570	625	1100	180	325	177	400	477	151	44	55	5	нет	нет
215	SMA	Sunny Highpower PEAK3	150	300	855	940	1500	180	325	480	600	690	151	44	55	5	нет	нет
216	SMA	Sunny Highpower PEAK3	172	344	939	1032	1500	180	325	528	660	759	151	44	55	5	нет	нет
217	SMA	Sunny Highpower PEAK3	180	360	982	1079	1500	180	325	552	690	793	151	44	55	5	нет	нет
218	SMA	Sunny Tripower Smart Energy	5	8	150	180	1000	20	13	156	230	277	8	45	55	44	нет	7,30
219	SMA	Sunny Tripower Smart Energy	6	9	150	180	1000	20	13	156	230	277	9	45	55	44	нет	8,70
220	SMA	Sunny Tripower Smart Energy	8	12	150	180	1000	20	13	156	230	277	12	45	55	44	нет	11,60
221	SMA	Sunny Tripower Smart Energy	10	15	150	180	1000	20	13	156	230	277	15	45	55	44	нет	14,50
222	SMA	Sunny Boy Smart Energy	4	7	60	66	600	30	15	184	230	253	16	44	66	6	нет	15,70

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
223	SMA	Sunny Boy Smart Energy	4	8	60	66	600	30	15	184	230	253	20	44	66	6	нет	17,40
224	SMA	Sunny Boy Smart Energy	5	10	60	66	600	30	15	184	230	253	25	44	66	6	нет	21,70
225	SMA	Sunny Boy Smart Energy	6	12	60	66	600	30	15	184	230	253	30	44	66	6	нет	26,10
226	SMA	Sunny Island	3		41		63		75	173	230	265	50	40	70	7	25	14,50
226	SMA	Sunny Island	3		41		63		75	173	230	265	50	40	70	7	25	14,50
227	SMA	Sunny Boy Storage	4		100	100	600	40	10	173	230	265		45	65	5	нет	16,00
228	SMA	Sunny Island	5		41		63		110	173	230	265	50	40	70	7	25	20,00
229	SMA	Sunny Boy Storage	5		100	100	600	40	10	173	230	265		45	65	5	нет	21,70
230	SMA	Sunny Boy Storage	6		100	100	600	40	10	173	230	265		45	65	5	нет	26,00
231	SMA	Sunny Island	6		41		63		140	173	230	265	50	40	70	7	25	26,10
232	SMA	Sunny Boy Storage	3		100	100	500	18	10	180	230	280	11	45	55	2	нет	нет
233	SMA	Sunny Highpower Storage	100	18	590		1500		180	320	400	460	151	44	55		нет	нет
234	SMA	Sunny Island X	30	31	200		980		150	187	400	528	46	44	66	25	нет	нет
235	SMA	Sunny Island X	50	51	200		980		150	187	400	528	76	44	66	25	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
236	SMA	Sunny Tripower Storage X	30	31	200		980		150	340	400	477	46	44	66	25	нет	нет
237	SMA	Sunny Tripower Storage X	50	51	200		980		150	340	400	477	76	44	66	25	нет	нет
238	SMA	Sunny Central Storage UP	3450		880		1500	500000	4750	480	600	720	3320	47	53	370	25	нет
239	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	2667		880		1500	500000	3200	480	600	720	2566	47	53	370	25	нет
240	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	4000		880		1500	500000	4750	480	600	720	3850	47	53	370	25	нет
241	SMA	Sunny Highpower Storage	150		880		1500		180	480	600	690	151	44	55		нет	нет
242	SMA	Sunny Central Storage UP	3620		921		1500	500000	4750	504	630	756	3320	47	53	370	25	нет
243	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	2800		921		1500	500000	3200	504	630	756	2566	47	53	370	25	нет
244	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	4200		921		1500	500000	4750	504	630	756	3850	47	53	370	25	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
245	SMA	Sunny Central Storage UP	3800		962		1500	500000	4750	528	660	759	3320	47	53	370	25	нет
246	SMA	Sunny Central Storage UP-S	2933		962		1500	500000	3200	528	660	792	2566	47	53	370	35	нет
247	SMA	Sunny Central Storage UP-S	4400		962		1500	500000	4750	528	660	792	3850	47	53	370	35	нет
248	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	2933		962		1500	500000	3200	528	660	759	2566	47	53	370	25	нет
249	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	4400		962		1500	500000	4750	528	660	759	3850	47	53	370	25	нет
250	SMA	Sunny Highpower Storage	172		968		1500		180	528	660	759	151	44	55		нет	нет
251	SMA	Sunny Central Storage UP	3960		1003		1500	500000	4750	552	690	759	3320	47	53	370	25	нет
252	SMA	Sunny Central Storage UP-S	3067		1003		1500	500000	3200	552	690	828	2566	47	53	370	35	нет
253	SMA	Sunny Central Storage UP-S	4600		1003		1500	500000	4750	552	690	828	3850	47	53	370	35	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
254	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	3067		1003		1500	500000	3200	552	690	759	2566	47	53	370	25	нет
255	SMA	Sunny Central Storage UP-XT	4600		1003		1500	500000	4750	552	690	759	3850	47	53	370	25	нет
256	SMA	Sunny Highpower Storage	180		1012		1500		180	552	690	793	151	44	55		нет	нет
257	Sungrow	SGxxRT	5	8	180	180	1100	32	25	180	230	276	8	45	55	6	нет	7,20
258	Sungrow	SGxxRS-S	2	3	40	50	600	20	16	154	230	276	9	45	55		нет	8,70
259	Sungrow	SGxxRT	6	9	180	180	1100	16	13	180	230	276	10	45	55	6	нет	8,70
260	Sungrow	SGxxRT	7	11	180	180	1100	32	25	180	230	276	12	45	55	6	нет	10,10
261	Sungrow	SGxxRS-S	3	4	40	50	600	20	16	154	230	276	11	45	55		нет	10,90
262	Sungrow	SGxxRT	8	12	180	180	1100	32	25	180	230	276	13	45	55	6	нет	11,60
263	Sungrow	SGxxRS	3	5	40	50	600	20	16	154	230	276	14	45	55		нет	13,10
264	Sungrow	SGxxRS-S	3	5	40	50	600	20	16	154	230	276	14	45	55		нет	13,10
265	Sungrow	SGxxRT	10	15	180	180	1100	32	25	180	230	276	17	45	55	6	нет	14,50
266	Sungrow	SGxxRS	4	5	40	50	600	20	16	154	230	276	16	45	55		нет	16,00
267	Sungrow	SGxxRS	4	6	40	50	600	20	16	154	230	276	18	45	55		нет	17,40

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
268	Sungrow	SGxxRT	12	18	180	180	1100	32	25	180	230	276	20	45	55	6	нет	17,40
269	Sungrow	SGxxRT	15	23	180	180	1100	32	25	180	230	276	25	45	55	6	нет	21,70
270	Sungrow	SGxxRS	5	8	40	50	600	20	16	154	230	276	23	45	55		нет	21,80
271	Sungrow	SGxxRT	17	26	180	180	1100	32	25	180	230	276	28	45	55	6	нет	24,60
272	Sungrow	SGxxRS	6	9	40	50	600	20	16	154	230	276	27	45	55		нет	26,10
273	Sungrow	SGxxRT	20	30	180	180	1100	32	25	180	230	276	32	45	55	6	нет	29,00
274	Sungrow	SGxxRS	8	12	40	50	600	20	16	154	230	276	36	45	55		нет	34,80
275	Sungrow	SGxxCX-P2	25	35	160	200	1100	40	30	312	400	480	42	45	55	7	нет	36,20
276	Sungrow	SGxxRS	9	14	40	50	600	20	16	154	230	276	41	45	55		нет	39,20
277	Sungrow	SGxxRS	10	15	40	50	600	20	16	154	230	276	46	45	55		нет	43,50
278	Sungrow	SGxxCX-P2	30	42	160	200	1100	40	30	312	400	480	50	45	55	7	нет	43,50
279	Sungrow	SGxxCX-P2	33	46	160	200	1100	40	30	312	400	480	55	45	55	7	нет	47,80
280	Sungrow	SGxxCX-P2	36	50	160	200	1100	40	30	312	400	480	60	45	55	7	нет	52,17
281	Sungrow	SGxxCX-P2	40	56	160	200	1100	40	30	312	400	480	67	45	55	7	нет	58,00
282	Sungrow	SGxxCX-P2	50	70	160	200	1100	40	30	312	400	480	84	45	55	7	нет	72,50
283	Sungrow	SGxxHX	250		500	550	1080	100	65	640	800	920	199	45	55	6	40	180,50

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
284	Sungrow	SGxxCX-P2	125	175	180	200	1100	40	30	320	400	480	181	45	55	5	нет	181,10
285	Sungrow	SGxxCX	150	210	180	200	1100	66	48	320	400	480	241	45	55	7	нет	216,50
286	Sungrow	SGxxHX	352		500	550	1080	60	40	640	800	920	254	45	55	6	30	231,00
287	Sungrow	SGxxCX	33		200	250	1100	40	26	312	400	528	55	45	55	2	нет	нет
288	Sungrow	SGxxCX	40		200	250	1100	40	26	312	400	528	67	45	55	2	нет	нет
289	Sungrow	SGxxCX	50		200	250	1100	40	26	312	400	528	84	45	55	2	нет	нет
290	Sungrow	SGxxCX	110		200	250	1100	40	26	320	400	460	159	45	55	2	нет	нет
291	Sungrow	SGxxUD	1100		895	905	1500	3528	1435	536	630	693	1160	45	55	200	45	нет
292	Sungrow	SGxxUD	3300		895	905	1500	3528	1435	536	630	693	1160	45	55	200	45	нет
293	Sungrow	SGxxUD	4400		895	905	1500	3528	1435	536	630	693	1160	45	55	200	45	нет
294	Sungrow	SGxxUD-20	1100		938	950	1500	3528	1435	561	660	726	1155	45	55	200	52	нет
295	Sungrow	SGxxUD-20	3300		938	950	1500	3528	1435	561	660	726	1155	45	55	200	52	нет
296	Sungrow	SGxxUD-20	4400		938	950	1500	3528	1435	561	660	726	1155	45	55	200	52	нет
297	Sungrow	SGxxHX	285		500	550	1080	60	40	640	800	920	206	45	55	6	40	нет
298	Sungrow	SGxxHX	333		500	550	1080	60	40	640	800	920	241	45	55	6	35	нет
299	Sungrow	SGxxHV-MV/HV-MV-30	3437		875	915	1500	10000	3997	20000		35000	3308	45	55		45	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
300	Sungrow	SGxxUD-MV	1100		895	905	1500	3528	1435	10000		35000	1160	45	55		45	нет
301	Sungrow	SGxxUD-MV	3300		895	905	1500	3528	1435	10000		35000	1160	45	55		45	нет
302	Sungrow	SGxxUD-MV	4400		895	905	1500	3528	1435	10000		35000	1160	45	55		45	нет
303	Sungrow	SGxxUD-MV	6600		895	905	1500	3528	1435	10000		35000	1160	45	55		45	нет
304	Sungrow	SGxxUD-MV	8800		895	905	1500	3528	1435	10000		35000	1160	45	55		45	нет
305	Sungrow	SGxxUD-MV-20	1100		938	950	1500	3528	1435	10000		35000	1155	45	55		51	нет
306	Sungrow	SGxxUD-MV-20	3300		938	950	1500	3528	1435	10000		35000		45	55		51	нет
307	Sungrow	SGxxUD-MV-20	4400		938	950	1500	3528	1435	10000		35000		45	55		51	нет
308	Sungrow	SGxxUD-MV-20	6600		938	950	1500	3528	1435	10000		35000		45	55		51	нет
309	Sungrow	SGxxUD-MV-20	8800		938	950	1500	3528	1435	10000		35000		45	55		51	нет
310	Sungrow	SHxxRS	3	5	40	50	600	20	16	154	230	276	14	45	55		нет	нет
311	Sungrow	SHxxRS	4	5	40	50	600	20	16	154	230	276	16	45	55		нет	нет
312	Sungrow	SHxxRS	4	6	40	50	600	20	16	154	230	276	18	45	55		нет	нет
313	Sungrow	SHxxRS	5	8	40	50	600	20	16	154	230	276	23	45	55		нет	нет
314	Sungrow	SHxxRS	6	9	40	50	600	20	16	154	230	276	27	45	55		нет	нет
315	Sungrow	SHxxRS	8	16	40	50	600	20	16	154	230	276	36	45	55		нет	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
316	Sungrow	SHxxRS	10	20	40	50	600	20	16	154	230	276	46	45	55		нет	нет
317	Sungrow	SHxxRT-20	5	8	150	180	1000	18	14	270	380	480	8	45	55		нет	нет
318	Sungrow	SHxxRT-20	6	9	200	250	1000	18	14	270	380	480	9	45	55		нет	нет
319	Sungrow	SHxxRT-20	8	12	200	250	1000	18	14	270	380	480	12	45	55		нет	нет
320	Sungrow	SHxxRT-20	10	15	200	250	1000	18	14	270	380	480	15	45	55		нет	нет
321	Sungrow	SHxxT	15	30	150	180	1000	100	80	270	380	480	23	45	55		нет	нет
322	Sungrow	SHxxT	20	40	150	180	1000	40	32	270	380	480	30	45	55		нет	нет
323	Sungrow	SHxxT	25	50	150	180	1000	40	32	270	380	480	38	45	55		нет	нет
324	Sungrow	SCxxUD-MV	2750		800		1500		1935	484	550	605	1587	45	55		45	нет
325	Sungrow	SCxxUD-MV	5500		800		1500		1935	484	550	605	1587	45	55		45	нет
326	Sungrow	SCxxUD-MV	3150		915		1500		1935	554	630	693	1587	45	55		45	нет
327	Sungrow	SCxxUD-MV	6300		915		1500		1935	554	630	693	1587	45	55		45	нет
328	Sungrow	SCxxUD-MV	3450		1000		1500		1935	607	690	759	1587	45	55		45	нет
329	Sungrow	SCxxUD-MV	6900		1000		1500		1935	607	690	759	1587	45	55		45	нет
330	Sungrow	SCxxUD-MV	4000		1150		1500		1952	704	800	880	2886	45	55		45	нет
331	Sungrow	SCxxUD-MV	5000		1300		1500		2154	792	900	990	3208	45	55		40	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частот а, Гц	Макс. вых. частот а, Гц	Собств . нужды , Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
332	Victron	EasySolar	1	1	10		17			225	230	235	16	50	50	8	25	нет
333	Victron	EasySolar	1	1	19		33			225	230	235	16	50	50	10	25	нет
334	Victron	EasySolar II	2	2	19		33			225	230	235		50	50	13	25	нет
335	Victron	EasySolar II	2	4	38		66			225	230	235		50	50	11	25	нет
336	Victron	EasySolar II	4	6	38		66			225	230	235		50	50	18	25	нет
337	Victron	Multi RS Solar	5			120	450	16	12	225	230	235	30	50	50	20	25	нет
338	Victron	MultiPlus	0		10		17			225	230	235		50	50	6	25	нет
339	Victron	MultiPlus	0		19		33			225	230	235		45	65	6	25	нет
340	Victron	MultiPlus	0		38		66			225	230	235		45	65	7	25	нет
341	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		45	65	7	25	нет
342	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		45	65	7	25	нет
343	Victron	MultiPlus	1		38		66			225	230	235		45	65	8	25	нет
344	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		45	65	10	25	нет
345	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		45	65	9	25	нет
346	Victron	MultiPlus	1		38		66			225	230	235		45	65	10	25	нет
347	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		45	65	10	25	нет
348	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		45	65	9	25	нет
349	Victron	MultiPlus	1		38		66			225	230	235		45	65	10	25	нет
350	Victron	MultiPlus	2		10		17			225	230	235		45	65	10	25	нет
351	Victron	MultiPlus	2		19		33			225	230	235		45	65	9	25	нет
352	Victron	MultiPlus	2		38		66			225	230	235		45	65	10	25	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частот а, Гц	Макс. вых. частот а, Гц	Собств . нужды , Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
353	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		50	50	8	25	нет
354	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		50	50	10	25	нет
355	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		50	50	8	25	нет
356	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		50	50	10	25	нет
357	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		50	50	8	25	нет
358	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		50	50	10	25	нет
359	Victron	MultiPlus	2		10		17			225	230	235		50	50	9	25	нет
360	Victron	MultiPlus	2		19		33			225	230	235		50	50	11	25	нет
341	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		45	65	7	25	нет
342	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		45	65	7	25	нет
343	Victron	MultiPlus	1		38		66			225	230	235		45	65	8	25	нет
344	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		45	65	10	25	нет
345	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		45	65	9	25	нет
346	Victron	MultiPlus	1		38		66			225	230	235		45	65	10	25	нет
347	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		45	65	10	25	нет
348	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		45	65	9	25	нет
349	Victron	MultiPlus	1		38		66			225	230	235		45	65	10	25	нет
350	Victron	MultiPlus	2		10		17			225	230	235		45	65	10	25	нет
351	Victron	MultiPlus	2		19		33			225	230	235		45	65	9	25	нет
352	Victron	MultiPlus	2		38		66			225	230	235		45	65	10	25	нет
353	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		50	50	8	25	нет
354	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		50	50	10	25	нет
355	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		50	50	8	25	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
356	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		50	50	10	25	нет
357	Victron	MultiPlus	1		10		17			225	230	235		50	50	8	25	нет
358	Victron	MultiPlus	1		19		33			225	230	235		50	50	10	25	нет
359	Victron	MultiPlus	2		10		17			225	230	235		50	50	9	25	нет
360	Victron	MultiPlus	2		19		33			225	230	235		50	50	11	25	нет
361	Victron	MultiPlus	2		10		17		250	225	230	235	11	50	50	20	25	нет
362	Victron	MultiPlus	2		19		33		125	225	230	235	11	50	50	20	25	нет
363	Victron	MultiPlus	2		38		66		65	225	230	235	11	50	50	25	25	нет
364	Victron	MultiPlus	4		19		33		238	225	230	235	19	50	50	30	25	нет
365	Victron	MultiPlus	4		38		66		118	225	230	235	19	50	50	35	25	нет
366	Victron	MultiPlus II	2		10		17			225	230	235		50	50	13	25	нет
367	Victron	MultiPlus II	2		19		33		32	225	230	235		50	50	13	25	нет
368	Victron	MultiPlus II	2		38		66		32	225	230	235		50	50	13	25	нет
369	Victron	MultiPlus II	4		10		17		50	225	230	235		50	50	11	25	нет
370	Victron	MultiPlus II	4		19		33		50	225	230	235		50	50	15	25	нет
371	Victron	MultiPlus II	4		38		66		50	225	230	235		50	50	18	25	нет
372	Victron	MultiPlus II	6		38		66		100	225	230	235		50	50	18	25	нет
373	Victron	MultiPlus II	8		38		66		100	225	230	235		50	50	29	25	нет
374	Victron	MultiPlus II	12		38		66		100	225	230	235		50	50	38	25	нет

Продолжение таблицы А.1

№	Фирма	Название линейки	Ном. вых. мощ., кВт	Макс. вх. пик. мощ., кВт	Мин. вх. напр., В	Напр. вкл. для СЭС, В	Макс. вх. напр., В	Макс. вх. ток КЗ, А	Макс. вх. ток, А	Мин. вых. напр., В	Ном. вых. напр., В	Макс. вых. напр., В	Макс. вых. ток, А	Мин. вых. частота, Гц	Макс. вых. частота, Гц	Собств. нужды, Вт	Темп. ном. мощ., град. С	Ном. вых. ток, А
375	Victron	MultiPlus II	4		38		60		32	225	230	235		50	50	55	25	нет
376	Victron	MultiPlus II	6		38		60		50	225	230	235		50	50	28	25	нет
377	Victron	MultiPlus II GX	4		38		60		32	225	230	235		50	50	20	25	нет
378	Victron	MultiPlus II GX	6		38		60		50	225	230	235		50	50	28	25	нет
379	Victron	MultiPlus II GX	2		19		33		32	225	230	235		50	50	13	25	нет
380	Victron	MultiPlus II GX	2		19		33		32	225	230	235		50	50	11	25	нет
381	Victron	MultiPlus II GX	4		38		66		50	225	230	235		50	50	18	25	нет
382	Victron	Quattro	2		10		17		250	225	230	235	11	50	50	20	25	нет
383	Victron	Quattro	2		19		33		125	225	230	235	11	50	50	20	25	нет
384	Victron	Quattro	4		10		17		458	225	230	235	19	50	50	30	25	нет
385	Victron	Quattro	4		19		33		238	225	230	235	19	50	50	30	25	нет
386	Victron	Quattro	4		38		66		118	225	230	235	19	50	50	35	25	нет
387	Victron	Quattro	6		19		33		381	225	230	235	30	50	50	60	25	нет
388	Victron	Quattro	6		38		66		188	225	230	235	30	50	50	60	25	нет
389	Victron	Quattro	8		38		66		235	225	230	235	37	50	50	60	25	нет
390	Victron	Quattro	12		38		66		350	225	230	235	53	50	50	110	25	нет
391	Victron	Quattro-II	4		19		33			225	230	235		50	50	18	25	нет
392	Victron	Quattro-II	4		38		66			225	230	235		50	50	18	25	нет

Таблица А.2 – Технические характеристики оборудования

№		Характеристика	1	2
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Хонуу	Кулун-Елбют
	2	Количество жителей , чел.	2155	226
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (1,5 МВт) + ДЭС (3,3 МВт) + СНЭ (630 кВт)	СЭС (103 кВт) + ДЭС (250 кВт) + СНЭ (60 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	Хевел	н/д
	5	Модель солнечных панелей	HVL-395/HJT	н/д
	6	Количество панелей	252	132
	7	Установленная мощность (кВт)	1500	100

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	1	2
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов	brizmotors	
	9	Модель генераторов	1) ДГМ 120-2 (тип дизеля MTU 12V4000G23) 2) 6хДГУ-550 (тип дизеля Volvo Penta TWD1645GE)	5хДГУ-50 (тип дизеля Deutz BF4M 2012C)
	10	Количество дизель-генераторов	7	5
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	4300	250
	12	Мощность одного генератора (кВт)	1) 1000 2) 550	50
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	414,4	508,5

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	1	2
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т.д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)	550	50
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)	630	60
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором	Sungrow Power Supply	Sungrow Power Supply
	20	Модель солнечного инвертора	SG110CX	SG33CX
	21	Количество солнечных инверторов	13/14	3
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	1	2
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, розничная торговля
	26	Крупные потребители	Цетральная котельная	Центральная котельная
	27	Теплоснабжение	нет	Котельная "Центральная"
	28	Макс. нагрузка, кВт	1 760,30	97
	29	Мин. нагрузка, кВт	190	14
Котельная	30	Оборудование	<ul style="list-style-type: none"> - котлы ТУРБОТерМ-ГАРАНТ (ТТГ) 4000-4МВт-4шт. - жидкотопливные горелки RMS 11, исп. ZMD-4шт. - пластинчатые теплообменники сетевой воды HHN42, фирмы ЗАО "РИДАН" г.Нижний Новгород; - циркуляционные насосы 1 контура IL 150/320-37/4, фирмы "WILO"; - сетевые насосы 2 контура NL 150/400-55-4-12, фирмы "WILO"; - рециркуляционные насосы TOP-S 80/10 3~PN6, фирмы "WILO" для поддержания температуры не ниже 60°C на входе в котлы; - "Декарбон-У" ООО "ТеХНОЛеС" - для магнитной обработки исходной воды. - ДЭС АД-315С-Т400-2Р 	

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	3	4
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Сасыр	Верхоянск
	2	Количество жителей , чел.	687	745
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (233 кВт) + ДЭС (600 кВт) + СНЭ (125 кВт)	СЭС (1 МВт) + ДЭС (2,3 МВт) + СНЭ (300 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	н/д	н/д
	5	Модель солнечных панелей	н/д	н/д
	6	Количество панелей	н/д	н/д
	7	Установленная мощность (кВт)	230	1030

Продолжение таблицы А.2

№	Характеристика	3	4
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов	
	9	Модель генераторов	<p>6хДГУ-100 (тип дизеля Deutz BF4M 1013FC)</p> <p>1) 2хДЭУ-320 (тип дизеля КТА19-G4, тип генератора Stamford HC 1544D2) 2) 2хДЭУ-500 (тип дизеля Cummins KTA38-G2A, тип генератора Stamford HC 1544F2) 3) 2хДГА-315 (тип дизеля 6ЧН 25/34, тип генератора СГ-2-85-45-12У3)</p>
	10	Количество дизель-генераторов	6
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	600
	12	Мощность одного генератора (кВт)	100
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	415,5

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	3	4
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		Sacred Sun
	16	Количество аккумуляторов		FCP-1000
	17	емкость (кВт·ч)		
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)		
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором	120	300
	20	Модель солнечного инвертора	Sungrow Power Supply	
	21	Количество солнечных инверторов	SG50CX	Сетевые трехфазные инверторы для солнечных панелей GW 136K-НТ 500 (VAC)
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		Двунаправленные батарейные инверторы GSE0150T
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	3	4
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная "Центральная", котельная "Школьная"	Котельная "САП", котельная "Авиапорт", котельная "Квартальная", котельная "Центральная"
	28	Макс. нагрузка, кВт	330	840
	29	Мин. нагрузка, кВт	40	100
Котельная	30	Оборудование	"Школьная" - КВм-1,74 х4 не указаны модели , но указано кол-во насосов Wilo - 7 шт. Существует резервный источник питания на все оборудование котельной - 60 кВт	

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	5	6
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Улахан-Кюель (Табалах)	Чумпу-Кытыл (Тебюлях)
	2	Количество жителей , чел.	776	214
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (400 кВт) + ДЭС (600 кВт) + СНЭ (125 кВт)	СЭС (100 кВт) + ДЭС (250 кВт) + СНЭ (60 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	LONGi	н/д
	5	Модель солнечных панелей	LR5-72HBD двухсторонние монокристаллические	н/д
	6	Количество панелей	н/д	н/д
	7	Установленная мощность (кВт)	400	100

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	5	6
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов		
	10	Количество дизель-генераторов	6хRID 130 (тип дизеля Deutz BF4M 1013FC, тип генератора LEROY SOMER LSA)	5хДГУ-50 (тип дизеля Deutz BF4M 2012C)
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	6	5
	12	Мощность одного генератора (кВт)	600	250
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	100	50

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	5	6
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)	Накопитель энергии на литий-ионных (LiFePO4) аккумуляторах серии LFP	
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)	107	50
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)	125	60
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором	Sungrow Power Supply	Sungrow Power Supply
	20	Модель солнечного инвертора	SG50CX	SG33CX
	21	Количество солнечных инверторов	7	
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	5	6
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная	Котельная "Центральная" (старая, резерв), котельная "Новая центральная"
	28	Макс. нагрузка, кВт	371	106
	29	Мин. нагрузка, кВт	38	12
Котельная	30	Оборудование		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	7	8
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Оймякон	Чумпу-Кытыл (Тебюлях)
	2	Количество жителей , чел.	560	214
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (231 кВт) + ДЭС (1845 кВт) + СНЭ (150 кВт)	СЭС (100 кВт) + ДЭС (250 кВт) + СНЭ (60 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	н/д	н/д
	5	Модель солнечных панелей	н/д	н/д
	6	Количество панелей	н/д	н/д
	7	Установленная мощность (кВт)	231	100

Продолжение таблицы А.2

№	Характеристика	7	8
Дизельная генерация	8 Производитель генераторов		
	9 Модель генераторов	1) 3хАД-150 (тип дизеля ЯМЗ-5368, тип генератора Stamford UCI274H1 и 2хLINZ PRO28S D/4) 2) АД-60 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора LINZ PRO28S D/4) 3) АД-80 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора LINZ PRO28S D/4)	5хАД-200 (тип дизеля ЯМЗ-6503.10, тип генератора LINZ PRO28S D/4)
	10 Количество дизель-генераторов	5	5
	11 Общая мощность дизельной генерации (кВт)	590	1000
	12 Мощность одного генератора (кВт)	1) 150 2) 60 3) 80	200
	13 Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	371,6	352

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	7	8
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)	138,2	276,5
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)	100	150
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора		
	21	Количество солнечных инверторов		
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	7	8
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение		Котельная "Илгэ", Котельная «Ясли-сад Б-Ю», Котельная «СДК Б-Ю»
	28	Макс. нагрузка, кВт	180	370
	29	Мин. нагрузка, кВт	22	50
Котельная	30	Оборудование	1 Вентилятор ВЦ 14-46-2,5 (4 кВт/3000) шт.2 2 Дымосос ДН-9(15кВт/1500) шт.2 3 Котел стальной водогрейный с механической топкой КСВм - 1,25К "ВК-3" шт.2 4Циклон ЦН-15-600х2УП шт. 2	

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Саняхтах	Чумпу-Кытыл (Тебюлях)
	2	Количество жителей , чел.	544	214
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (198 кВт) + ДЭС (800 кВт) + СНЭ (150 кВт)	СЭС (100 кВт) + ДЭС (250 кВт) + СНЭ (60 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	н/д	н/д
	5	Модель солнечных панелей	н/д	н/д
	6	Количество панелей	н/д	н/д
	7	Установленная мощность (кВт)	198	100

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов	<p>1) 3хДЭУ-300 (тип дизеля P158LE-1, тип генератора LSA 47.2 VS2)</p> <p>1) 2хАД-315 (тип дизеля ЯМЗ 8503.10, тип генератора LSA 47.2VS2 С 6/4)</p>	<p>1) 2хДГА-315 (тип дизеля 6ЧН 25/34, тип генератора СГ-2-85-45-12У3)</p> <p>2) АД-250 (тип дизеля 8ЧН 12/12 АД-250-Т400-1Р-Камаз, тип генератора Stamford)</p> <p>3) 2хАД-315 (тип дизеля ЯМЗ 8503.10, тип генератора Stamford и LINZ PRO28I G/4)</p> <p>4) АД-200 (тип дизеля 8ЧН 12/12 АД-250-Т400-1Р-Камаз, тип генератора Stamford UCDI274K1)</p>
	10	Количество дизель-генераторов	5	6
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	1530	1610
	12	Мощность одного генератора (кВт)	<p>1) 300</p> <p>2) 315</p>	<p>1) 315</p> <p>2) 200</p> <p>3) 315</p> <p>4) 150</p>
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	434,8	410,8

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)	345,6	276,5
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)	250	150
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора		
	21	Количество солнечных инверторов		
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная "Надежда"	
	28	Макс. нагрузка, кВт		277
	29	Мин. нагрузка, кВт		38
Котельная	30	Оборудование		1.Котел водогрейный КВр-0,35 (0,35) поставляется с г.Якутска 2. Насос сетевой Wilo с сухим ротором IL 80 170-3,5/2, мощность электродвигателя 3,5 кВт 3.Насос подпиточный Wilo с сухим ротором IL 32 140-1,5/2, мощность электродвигателя 1,5 кВт.

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Саняхтах	Чумпу-Кытыл (Тебюлях)
	2	Количество жителей , чел.	544	214
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (198 кВт) + ДЭС (800 кВт) + СНЭ (150 кВт)	СЭС (100 кВт) + ДЭС (250 кВт) + СНЭ (60 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	н/д	н/д
	5	Модель солнечных панелей	н/д	н/д
	6	Количество панелей	н/д	н/д
	7	Установленная мощность (кВт)	198	100

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов	1) 3хДЭУ-300 (тип дизеля P158LE-1, тип генератора LSA 47.2 VS2) 1) 2хАД-315 (тип дизеля ЯМЗ 8503.10, тип генератора LSA 47.2VS2 С 6/4)	1) 2хДГА-315 (тип дизеля 6ЧН 25/34, тип генератора СГ-2-85-45-12У3) 2) АД-250 (тип дизеля 8ЧН 12/12 АД-250-Т400-1Р-Камаз, тип генератора Stamford) 3) 2хАД-315 (тип дизеля ЯМЗ 8503.10, тип генератора Stamford и LINZ PRO28I G/4) 4) АД-200 (тип дизеля 8ЧН 12/12 АД-250-Т400-1Р-Камаз, тип генератора Stamford UCDI274K1)
	10	Количество дизель-генераторов	5	6
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	1530	1610
	12	Мощность одного генератора (кВт)	1) 300 2) 315	1) 315 2) 200 3) 315 4) 150
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	434,8	410,8

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)	345,6	276,5
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)	250	150
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора		
	21	Количество солнечных инверторов		
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	9	10
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная "Надежда"	
	28	Макс. нагрузка, кВт		277
	29	Мин. нагрузка, кВт		38
Котельная	30	Оборудование		1. Котел водогрейный КВр-0,35 (0,35) поставляется с г.Якутска 2. Насос сетевой Wilo с сухим ротором IL 80 170-3,5/2, мощность электродвигателя 3,5 кВт 3. Насос подпиточный Wilo с сухим ротором IL 32 140-1,5/2, мощность электродвигателя 1,5 кВт.

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	11	12
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Дабан	Урицкое
	2	Количество жителей , чел.	313	246
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (66 кВт) + ДЭС (600 кВт) + СНЭ (100 кВт)	СЭС (50 кВт) + ДЭС (350 кВт) + СНЭ (50 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	н/д	н/д
	5	Модель солнечных панелей	н/д	н/д
	6	Количество панелей	н/д	н/д
	7	Установленная мощность (кВт)	66	50

Продолжение таблицы А.2

№	Характеристика	11	12
Дизельная генерация	8 Производитель генераторов		
	9 Модель генераторов	1) 2хАД-150 (тип дизеля ЯМЗ-5368, тип генератора LINZ PRO28S В/4) 2) АД-80 (тип дизеля ЯМЗ-5348)	1) 3хАД-80 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора 2хБГ-100 83У-2 и БГ-60-4У2) 2) АД-60 (тип дизеля ЯМЗ - 5348, тип генератора ГСБ-80-4У2) 3) АД-40 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора ГСБ-60-4У2)
	10 Количество дизель-генераторов	3	5
	11 Общая мощность дизельной генерации (кВт)	380	340
	12 Мощность одного генератора (кВт)	1) 150 2) 80	1) 80 2) 60 3) 40
	13 Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	345,7	476,7

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	11	12
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		литий-ионных аккумуляторных батарей типа LiFePO4
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)	207	138,2
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)	100	50
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора		
	21	Количество солнечных инверторов		
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	11	12
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		Нет
	27	Теплоснабжение		
	28	Макс. нагрузка, кВт	121	89
	29	Мин. нагрузка, кВт	18	3
Котельная	30	Оборудование	<p>Котел водогрейный КВр-0,5(0,58) Дымосос Д-3,5М-1500 Вентилятор дутьевой ВЦ-14-46 №2 Насос сетевой Wilo с сухим ротором IL 80 190-15/2, мощность электродвигателя 15 кВт Насос подпиточные Wilo с сухим ротором IL 32 150-2,2/2, мощность электродвигателя 2,2 кВт Золоуловитель ЗУ-0,4</p> <p>Дополнительно есть ТЗ на резервный источник питания для котельной на 60кВт</p>	<p>Котел водогрейный КВр – 0,6 (или аналог) Дымосос Д-3,5М-1500 – 2 шт.; Насос сетевой Wilo с сухим ротором IL 80 150-7.5/2, мощность электродвигателя 7.5 кВт – 1 шт.; Насос подпиточный Wilo с сухим ротором IL 32 150-0.75/2, мощность электродвигателя 0.75 кВт</p>

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	13	14
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Батамай	Ючюгей
	2	Количество жителей , чел.	210	374
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (60 кВт) + ДЭС (160 кВт) + СНЭ (н/д кВт)	СЭС (30 кВт) + ДЭС (550 кВт) + СНЭ (н/д)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	1) н/д 2-3) Sunways 4) EC Solar	1) Sunways 2) Amerisolar
	5	Модель солнечных панелей	1) JRM-195 2) FSM-230 3) FSM-250 4) ECS250M60-A	1) FSM-230 2) AC-260
	6	Количество панелей	1) 52 2) 73 3) 13 4) 120	1) 87 2) 39
	7	Установленная мощность (кВт)	60	30

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	13	14
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов	1) АД-50 (тип дизеля Cummins 4BTA 3.9-G2, тип генератора Stamford UC.I224F) 2) АД-75 (тип дизеля Cummins 6BT 5.9-G2, тип генератора Stamford UC.I274C) 3) АД-70 (тип дизеля ЯМЗ-5348-20, тип генератора Stamford UC.I274C) 4) АД-80 (тип дизеля Cummins 6BТАА 5.9-G2, тип генератора Stamford UC.I274E14)	1) 2хДЭУ-160 (тип дизеля Cummins 6CTAA8.3-G2, тип генератора Stamford UC.I274F14) 2) ДЭУ-100 (тип дизеля Cummins 6BТАА 5.9-G2, тип генератора Stamford UC.I274C14) 3) ДЭУ-50 (тип дизеля Cummins 4BTA 3.9-G2, тип генератора Stamford UC.I224e14) 4) АД-80 (тип дизеля Cummins 6BTA 5.9-G2)
	10	Количество дизель-генераторов	4	5
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	240	550
	12	Мощность одного генератора (кВт)	1) 30 2) 60 3) 70 4) 80	1) 160 2) 100 3) 50 4) 80
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	390,8	410,7

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	13	14
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)	АКБ LT-LFP 300 - 90 шт.	АКБ ВАЕ 12 OPzV 1500 – 48 шт.
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)	86,4	
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)		
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора	Сетевой инвертор SMA STP 10000 TL	Сетевой инвертор SMA STP 10000 TL
	21	Количество солнечных инверторов	6	3
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора	Автономный инвертор SMA Sunny Island SL6.0H	Автономный инвертор SMA Sunny Island SL8.0H
	24	Количество батарейных инверторов	6	6

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	13	14
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная "Школа"	Котельная «КМТ-2,5», Котельная «Центральная» КМТ-2,5
	28	Макс. нагрузка, кВт	122	120
	29	Мин. нагрузка, кВт	1	2
Котельная	30	Оборудование		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	15	16
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Дулгалах	Куду-Кюель
	2	Количество жителей , чел.	281	220
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (30 кВт) + ДЭС (560)	СЭС (20 кВт) + ДЭС (327 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	EC Solar	EC Solar
	5	Модель солнечных панелей	ECS250M60	ECS250M60
	6	Количество панелей	80	80
	7	Установленная мощность (кВт)	20	20

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	15	16
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов	<p>1) 2хАД-150 (тип дизеля ЯМЗ-5368, тип генератора LSA 442VS3 C6/4 и ГСБ-150-4У2)</p> <p>2) 2хДЭУ-100 (тип дизеля 8ЧН13/14 (ЯМЗ-238), тип генератора LSA 442S7 J6/4)</p> <p>3) ДЭУ-60 (тип дизеля 6Ч13/14 (ЯМЗ-236), тип генератора LSA 442VS3 C6/4)</p>	<p>1) 2хАД-75 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора ГБС-100-4УЛХЗ)</p> <p>2) АД-125 (тип дизеля ЯМЗ-5368, тип генератора ГБС-160-4УЛХЗ)</p> <p>3) АД-12 (тип дизеля 4Ч 11/12.5 (Д246.1), тип генератора ГБС-20-4УЛХЗ)</p> <p>4) АД-40 (тип дизеля 4Ч 11/12.5 (Д246.1), тип генератора ГБС-50-4УЛХЗ)</p>
	10	Количество дизель-генераторов	5	5
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	560	327
	12	Мощность одного генератора (кВт)	<p>1) 150</p> <p>2) 100</p> <p>3) 60</p>	<p>1) 75</p> <p>2) 125</p> <p>3) 12</p> <p>4) 40</p>
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	524,2	513,3

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	15	16
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)		
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)		
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора	Сетевой инвертор SMA STP 10000 TL	Сетевой инвертор SMA STP 10000 TL
	21	Количество солнечных инверторов	2	2
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	15	16
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение		
	28	Макс. нагрузка, кВт	155	69
	29	Мин. нагрузка, кВт	8	2
Котельная	30	Оборудование		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	17	18
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Куберганя	Тойон-Ары
	2	Количество жителей , чел.	479	116
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (20 кВт) + ДЭС (670 кВт)	СЭС (20 кВт) + ДЭС (560 кВт) + СНЭ (н/д кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	Zhejiang BLD Solar Technology Co	Risen Energy Co
	5	Модель солнечных панелей	BLD240-60P	RSM60-156P/250W
	6	Количество панелей	85	80
	7	Установленная мощность (кВт)	20	20

Продолжение таблицы А.2

№	Характеристика	17	18
Дизельная генерация	8 Производитель генераторов		
	9 Модель генераторов	<p>1) 3хАД-150 (тип дизеля - ЯМЗ-5368, тип генератора БГ-100-4У2)</p> <p>2) 2хАД-100 (тип дизеля - ЯМЗ-5348, тип генератора БГ-60-4У2)</p>	<p>1) АД-60 (тип дизеля Cummins 6BT 5,9-G2, тип генератора Stamford UCI224G)</p> <p>2) АД-40 (тип дизеля Cummins 4BT 3.9-G2, тип генератора JSA224M3)</p> <p>3) ДЭУ-100 (тип дизеля 8ЧН13/14 (ЯМЗ-238), тип генератора ГС-100Б)</p> <p>4) АД-60 (тип дизеля 6Ч13/14 (ЯМЗ-236), тип генератора Stamford)</p> <p>5) АД-150 (тип дизеля ЯМЗ-5368)</p>
	10 Количество дизель-генераторов	5	6
	11 Общая мощность дизельной генерации (кВт)	670	560
	12 Мощность одного генератора (кВт)	<p>1) 150</p> <p>2) 100</p>	<p>1) 60</p> <p>2) 40</p> <p>3) 100</p> <p>4) 60</p> <p>5) 150</p>
	13 Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	391,8	473,7

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	17	18
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		АГЭМ 2000Ач/48В – 48 шт.
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)		96
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)		
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора	Сетевой инвертор SMA STP 10000 TL	Сетевой инвертор SMA STP 17000 TL
	21	Количество солнечных инверторов	2	1
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		Автономный инвертор SMA Sunny Island SL8.0H
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	17	18
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение		Котельная "Кытанах Кырдал"
	28	Макс. нагрузка, кВт	219	66
	29	Мин. нагрузка, кВт	30	9
Котельная	30	Оборудование		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	19	20
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Джаргалах	Тойон-Ары
	2	Количество жителей , чел.	336	237
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (40 кВт) + ДЭС (775 кВт)	СЭС (15 кВт) + ДЭС (530 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	EC Solar	1) Zhejiang BLD Solar Technology 2) Himin Solar Energy Group 3-4) NexPower Technology Corp
	5	Модель солнечных панелей	ECS250M60-A	1) BLD240-60P 2) Himin HG-250S/Da 3) NexPower NT-145AX 4) NexPower NT-155AF
	6	Количество панелей	160	1) 20 2) 20 3) 11 4) 22
	7	Установленная мощность (кВт)	40	15

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	19	20
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов	<p>1) 2хАД-75С (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора STAMFORD UC.I274C2)</p> <p>2) 5хАД-125С (тип дизеля ЯМЗ-5368, тип генератора STAMFORD UC.I274H2)</p>	<p>1) АД-60 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора Stamford UCDI274K14)</p> <p>2) АД-160 (тип дизеля Cummins 6CTAA8.3-G2, тип генератора Stamford UCI274H14)</p> <p>3) АД-200 (тип дизеля Cummins 6LТАА 8,9 - G2, тип генератора Stamford UC274C14)</p> <p>4) АД-80 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора Stamford)</p> <p>5) АД-30 (тип дизеля 4Ч 11/12,5 (Д-243), тип генератора Stamford UCI224C2)</p>
	10	Количество дизель-генераторов	7	5
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	775	530
	12	Мощность одного генератора (кВт)	<p>1) 75</p> <p>2) 125</p>	<p>1) 60</p> <p>2) 160</p> <p>3) 200</p> <p>4) 80</p> <p>5) 30</p>
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	537,8	452,9

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	19	20
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)		
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)		
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора	Сетевой инвертор SMA STP 10000	Сетевой инвертор SMA STP 5000 TL
	21	Количество солнечных инверторов	4	3
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	19	20
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная "Солнечная"	Котельная N 5 "Сайды"
	28	Макс. нагрузка, кВт	148	190
	29	Мин. нагрузка, кВт	10	9
Котельная	30	Оборудование		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	21	22
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Батагай	Бетенкес
	2	Количество жителей , чел.	3759	619
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (1000 кВт) + ДЭС (12120 кВт)	СЭС (40 кВт) + ДЭС (1145 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	Suntech Power	Suntech Power
	5	Модель солнечных панелей	STP 300-24Ve	STP 300-24Ve
	6	Количество панелей	3472	136
	7	Установленная мощность (кВт)	1000	40

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	21	22
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов	1) 7Д100 (тип дизеля 10Д1А20.7/2х25,4, тип генератора СГДС 15-30-8УХЛ4) 2) 3хАД-750 (тип дизеля 8ЧН 26/26, тип генератора СГДС 15-30-8УХЛ4) 3) 6х4-26ДГ (тип дизеля 12ЧН26/26, тип генератора СГС 1370-750УЗ) 4) 7-36ДГ (тип дизеля 8ЧН 26/26, тип генератора ГСД 1650-1000) 5) АД-150 (тип дизеля ЯМЗ-5368, тип генератора ГС-100У2)	1) 3хДГА-315 (тип дизеля 6ЧН 25/34, тип генератора СГ2-85-45-12) 2) ДЭУ-200 (тип дизеля 8ЧН 14/14 (ТМЗ-8481.10-05))
	10	Количество дизель-генераторов	12	4
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	12120	1145
	12	Мощность одного генератора (кВт)	1) 1000 2) 750 3) 1100 4) 1120 5) 150	1) 315 2) 200
	13	Удельный расход условного топлива (гуд/кВтч)	386,5	470,7

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	21	22
Система накопления энергии	14	Производитель	Без снэ	
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)		
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)		
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора	Сетевой инвертор SMA STP 25000 TL	Сетевой инвертор SMA STP 10000 TL
	21	Количество солнечных инверторов	40	4
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	21	22
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная "Озерная", котельная "Геолог", котельная "Авиапорт", (котельная "СУОЛ", котельная "N 2",) котельная "Квартальная", котельная Центральная	Котельная Центральная
	28	Макс. нагрузка, кВт	4218	260
	29	Мин. нагрузка, кВт	162	30
Котельная	30	Оборудование	Котельная оснащена шестью котлами по 3 МВт общей мощностью 18 МВт, из которых три являются рабочими, а три — запасными	

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	23	24
Общая информация о населенном пункте	1	Название	Столбы	Юнкюр
	2	Количество жителей , чел.	1053	1032
	3	Существующая энергоинфраструктура	СЭС (10 кВт) + ДЭС (520 кВт)	СЭС (40 кВт) + ДЭС (650 кВт)
Солнечная генерация	4	Производитель панелей, кВтч	Suntech Power	S-Energy
	5	Модель солнечных панелей	STP 300-24Ve	Alfasolar Pyramid 60255/250
	6	Количество панелей	34	161
	7	Установленная мощность (кВт)	10	40

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	23	24
Дизельная генерация	8	Производитель генераторов		
	9	Модель генераторов	<p>1) 2хАД-160 (тип дизеля Cummins 6CTA8.3-G2, тип генератора stamford)</p> <p>2) АД-100 (тип дизеля ЯМЗ-5348, тип генератора LINZ PRO022M E/4)</p> <p>3) ДЭУ-100 (тип дизеля 8ЧН13/14 (ЯМЗ-238))</p>	<p>1) АД-160 (тип дизеля Cummins 6LTAA 8,9 - G2, тип генератора Stamford UCDI274K14)</p> <p>2) АД-160 (тип дизеля Cummins 6CTA8.3-G2, тип генератора Stamford UCDI274K14)</p> <p>3) АД-150 (тип дизеля ЯМЗ-5368, тип генератора NS160C)</p> <p>4) АД-80 (тип дизеля Cummins 6BTA 5.9-G2, тип генератора NS110C)</p> <p>5) ДЭУ-100 (тип дизеля 8ЧН13/14 (ЯМЗ-238), тип генератора ГС-100-БП-3У-0)</p>
	10	Количество дизель-генераторов	4	5
	11	Общая мощность дизельной генерации (кВт)	520	650
	12	Мощность одного генератора (кВт)	<p>1) 160</p> <p>2) 100</p> <p>3) 100</p>	<p>1) 160</p> <p>2) 160</p> <p>3) 150</p> <p>4) 80</p> <p>5) 100</p>
	13	Удельный расход условного топлива (г/кВтч)	405,3	509

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	23	24
Система накопления энергии	14	Производитель		
	15	Тип аккумуляторов (Li-ion, свинцово-кислотные, flow-батареи и т. д.)		
	16	Количество аккумуляторов		
	17	емкость (кВт·ч)		
	18	Максимальная мощность заряда/разряда (кВт)		
Система управления и контроля (инверторы)	19	Производитель солнечных инвертором		
	20	Модель солнечного инвертора	Сетевой инвертор SMA STP 10000	Сетевой инвертор SMA STP 20000 TL
	21	Количество солнечных инверторов	1	2
	22	Производитель батарейных инвертором		
	23	Модель батарейного инвертора		
	24	Количество батарейных инверторов		

Продолжение таблицы А.2

№		Характеристика	23	24
Энергопотребление населенного пункта	25	Основные потребители	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля	Учреждения образования, культуры, здравоохранения, торговые точки - образовательные, медицинские, культурные услуги, розничная торговля
	26	Крупные потребители		
	27	Теплоснабжение	Котельная Центральная	
	28	Макс. нагрузка, кВт	126	25
	29	Мин. нагрузка, кВт	15	2
Котельная	30	Оборудование		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Моделирование резкопеременной нагрузки

Таблица Б.1 – График изменения тока при работе резкопеременной нагрузки

Время, сек	P, о.е.	Время, сек	P, о.е.	Время, сек	P, о.е.	Время, сек	P, о.е.
0	0	0,15	16,03	0,3	15,91	0,45	15,87
0	18,5	0,15	15,82	0,3	15,79	0,45	15,85
0,01	16,52	0,16	16,02	0,31	15,92	0,46	15,77
0,01	15,82	0,16	16,25	0,31	16,07	0,46	15,74
0,02	16,15	0,17	16,07	0,32	15,98	0,47	15,8
0,02	16,32	0,17	15,82	0,32	15,81	0,47	15,84
0,03	16,04	0,18	15,95	0,33	15,84	0,48	15,8
0,03	15,89	0,18	16,22	0,33	16	0,48	15,73
0,04	16,19	0,19	16,12	0,34	16,02	0,49	15,73
0,04	16,3	0,19	15,84	0,34	15,86	0,49	15,78
0,05	16	0,2	15,89	0,35	15,79	0,5	15,8
0,05	15,89	0,2	16,16	0,35	15,91	0,5	15,76
0,06	16,2	0,21	16,16	0,36	16,01	0,51	15,71
0,06	16,28	0,21	15,88	0,36	15,93	0,51	15,72
0,07	15,98	0,22	15,83	0,37	15,79	0,52	15,76
0,07	15,88	0,22	16,08	0,37	15,82	0,52	15,76
0,08	16,19	0,23	16,17	0,38	15,95	0,53	15,72
0,08	16,27	0,23	15,94	0,38	15,96	0,53	15,68
0,09	15,97	0,24	15,8	0,39	15,84	0,54	15,7
0,09	15,87	0,24	15,99	0,39	15,77	0,54	15,73
0,1	16,17	0,25	16,16	0,4	15,86	0,55	15,72
0,1	16,27	0,25	16,01	0,4	15,94	0,55	15,68
0,11	15,97	0,26	15,81	0,41	15,89	0,56	15,65
0,11	15,85	0,26	15,9	0,41	15,78	0,56	15,67
0,12	16,14	0,27	16,11	0,42	15,78	0,57	15,69
0,12	16,27	0,27	16,07	0,42	15,88	0,57	15,68
0,13	15,99	0,28	15,85	0,43	15,91	0,58	15,64
0,13	15,83	0,28	15,83	0,43	15,82	0,58	15,62
0,14	16,09	0,29	16,02	0,44	15,75	0,59	15,64
0,14	16,27	0,29	16,09	0,44	15,79	0,59	15,65

Продолжение таблицы Б.1

Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.
0,6	15,64	0,75	15,35	0,9	14,92	1,05	14,2
0,6	15,61	0,75	15,34	0,9	14,9	1,05	14,17
0,61	15,59	0,76	15,33	0,91	14,88	1,06	14,14
0,61	15,6	0,76	15,31	0,91	14,86	1,06	14,11
0,62	15,61	0,77	15,3	0,92	14,84	1,07	14,07
0,62	15,6	0,77	15,29	0,92	14,82	1,07	14,04
0,63	15,57	0,78	15,28	0,93	14,8	1,08	14,01
0,63	15,56	0,78	15,27	0,93	14,78	1,08	13,97
0,64	15,56	0,79	15,25	0,94	14,76	1,09	13,94
0,64	15,56	0,79	15,24	0,94	14,74	1,09	13,9
0,65	15,56	0,8	15,23	0,95	14,72	1,1	13,86
0,65	15,53	0,8	15,21	0,95	14,7	1,1	13,83
0,66	15,52	0,81	15,2	0,96	14,68	1,11	13,79
0,66	15,52	0,81	15,19	0,96	14,65	1,11	13,75
0,67	15,52	0,82	15,17	0,97	14,63	1,12	13,71
0,67	15,51	0,82	15,16	0,97	14,61	1,12	13,67
0,68	15,49	0,83	15,14	0,98	14,58	1,13	13,63
0,68	15,47	0,83	15,13	0,98	14,56	1,13	13,58
0,69	15,47	0,84	15,11	0,99	14,54	1,14	13,54
0,69	15,47	0,84	15,1	0,99	14,51	1,14	13,5
0,7	15,46	0,85	15,08	1	14,48	1,15	13,45
0,7	15,45	0,85	15,07	1	14,46	1,15	13,41
0,71	15,43	0,86	15,05	1,01	14,43	1,16	13,36
0,71	15,42	0,86	15,04	1,01	14,41	1,16	13,31
0,72	15,41	0,87	15,02	1,02	14,38	1,17	13,26
0,72	15,41	0,87	15	1,02	14,35	1,17	13,21
0,73	15,4	0,88	14,99	1,03	14,32	1,18	13,16
0,73	15,38	0,88	14,97	1,03	14,29	1,18	13,11
0,74	15,37	0,89	14,95	1,04	14,26	1,19	13,06
0,74	15,36	0,89	14,94	1,04	14,23	1,19	13,01

Продолжение таблицы Б.1

Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.
1,2	12,95	1,35	10,74	1,5	7,4	1,65	4,18
1,2	12,9	1,35	10,64	1,5	7,28	1,65	4,1
1,21	12,84	1,36	10,55	1,51	7,16	1,66	4,01
1,21	12,78	1,36	10,45	1,51	7,04	1,66	3,93
1,22	12,72	1,37	10,35	1,52	6,92	1,67	3,86
1,22	12,66	1,37	10,25	1,52	6,8	1,67	3,78
1,23	12,6	1,38	10,15	1,53	6,68	1,68	3,71
1,23	12,54	1,38	10,04	1,53	6,56	1,68	3,64
1,24	12,48	1,39	9,94	1,54	6,44	1,69	3,57
1,24	12,41	1,39	9,83	1,54	6,33	1,69	3,5
1,25	12,34	1,4	9,73	1,55	6,21	1,7	3,43
1,25	12,28	1,4	9,62	1,55	6,1	1,7	3,37
1,26	12,21	1,41	9,51	1,56	5,98	1,71	3,31
1,26	12,14	1,41	9,4	1,56	5,87	1,71	3,25
1,27	12,07	1,42	9,29	1,57	5,76	1,72	3,19
1,27	11,99	1,42	9,17	1,57	5,65	1,72	3,13
1,28	11,92	1,43	9,06	1,58	5,54	1,73	3,08
1,28	11,85	1,43	8,95	1,58	5,43	1,73	3,02
1,29	11,77	1,44	8,83	1,59	5,32	1,74	2,97
1,29	11,69	1,44	8,71	1,59	5,22	1,74	2,92
1,3	11,61	1,45	8,6	1,6	5,12	1,75	2,88
1,3	11,53	1,45	8,48	1,6	5,01	1,75	2,83
1,31	11,45	1,46	8,36	1,61	4,91	1,76	2,78
1,31	11,36	1,46	8,24	1,61	4,82	1,76	2,74
1,32	11,28	1,47	8,12	1,62	4,72	1,77	2,7
1,32	11,19	1,47	8	1,62	4,62	1,77	2,66
1,33	11,11	1,48	7,88	1,63	4,53	1,78	2,62
1,33	11,02	1,48	7,76	1,63	4,44	1,78	2,58
1,34	10,93	1,49	7,64	1,64	4,35	1,79	2,55
1,34	10,83	1,49	7,52	1,64	4,26	1,79	2,51

Продолжение таблицы Б.1

Время, сек	P, о.е.	Время, сек	P, о.е.	Время, сек	P, о.е.	Время, сек	P, о.е.
1,8	2,48	1,95	1,9	2,1	1,75	2,25	1,7
1,8	2,45	1,95	1,9	2,1	1,74	2,25	1,7
1,81	2,42	1,96	1,89	2,11	1,74	2,26	1,7
1,81	2,39	1,96	1,88	2,11	1,74	2,26	1,7
1,82	2,36	1,97	1,87	2,12	1,74	2,27	1,7
1,82	2,33	1,97	1,86	2,12	1,73	2,27	1,7
1,83	2,3	1,98	1,85	2,13	1,73	2,28	1,7
1,83	2,28	1,98	1,85	2,13	1,73	2,28	1,7
1,84	2,25	1,99	1,84	2,14	1,73	2,29	1,7
1,84	2,23	1,99	1,83	2,14	1,73	2,29	1,7
1,85	2,21	2	1,83	2,15	1,73	2,3	1,7
1,85	2,18	2	1,82	2,15	1,72	2,3	1,7
1,86	2,16	2,01	1,82	2,16	1,72	2,31	1,7
1,86	2,14	2,01	1,81	2,16	1,72	2,31	1,7
1,87	2,12	2,02	1,8	2,17	1,72	2,32	1,7
1,87	2,11	2,02	1,8	2,17	1,72	2,32	1,7
1,88	2,09	2,03	1,79	2,18	1,72	2,33	1,7
1,88	2,07	2,03	1,79	2,18	1,72	2,33	1,7
1,89	2,06	2,04	1,79	2,19	1,71	2,34	1,7
1,89	2,04	2,04	1,78	2,19	1,71	2,34	1,7
1,9	2,02	2,05	1,78	2,2	1,71	2,35	1,7
1,9	2,01	2,05	1,77	2,2	1,71	2,35	1,7
1,91	2	2,06	1,77	2,21	1,71	2,36	1,7
1,91	1,98	2,06	1,77	2,21	1,71	2,36	1,69
1,92	1,97	2,07	1,76	2,22	1,71	2,37	1,69
1,92	1,96	2,07	1,76	2,22	1,71	2,37	1,69
1,93	1,95	2,08	1,76	2,23	1,71	2,38	1,69
1,93	1,94	2,08	1,75	2,23	1,71	2,38	1,69
1,94	1,92	2,09	1,75	2,24	1,71	2,39	1,69
1,94	1,91	2,09	1,75	2,24	1,7	2,39	1,69

Продолжение таблицы Б.1

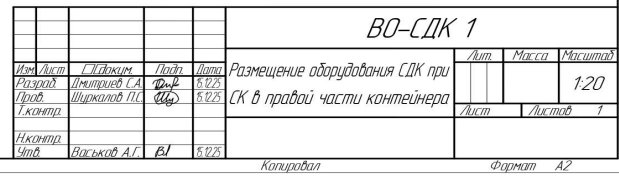
Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.	Время, сек	<i>P</i> , о.е.
2,4	1,69						
2,4	1,69						
2,41	1,69						
2,41	1,69						
2,42	1,69						
2,42	1,69						
2,43	1,69						
2,43	1,69						
2,44	1,69						
2,44	1,69						
2,45	1,69						
2,45	1,69						
2,46	1,69						
2,46	1,69						
2,47	1,69						
2,47	1,69						
2,48	1,69						
2,48	1,69						
2,49	1,69						
2,49	1,69						
2,5	1,69						

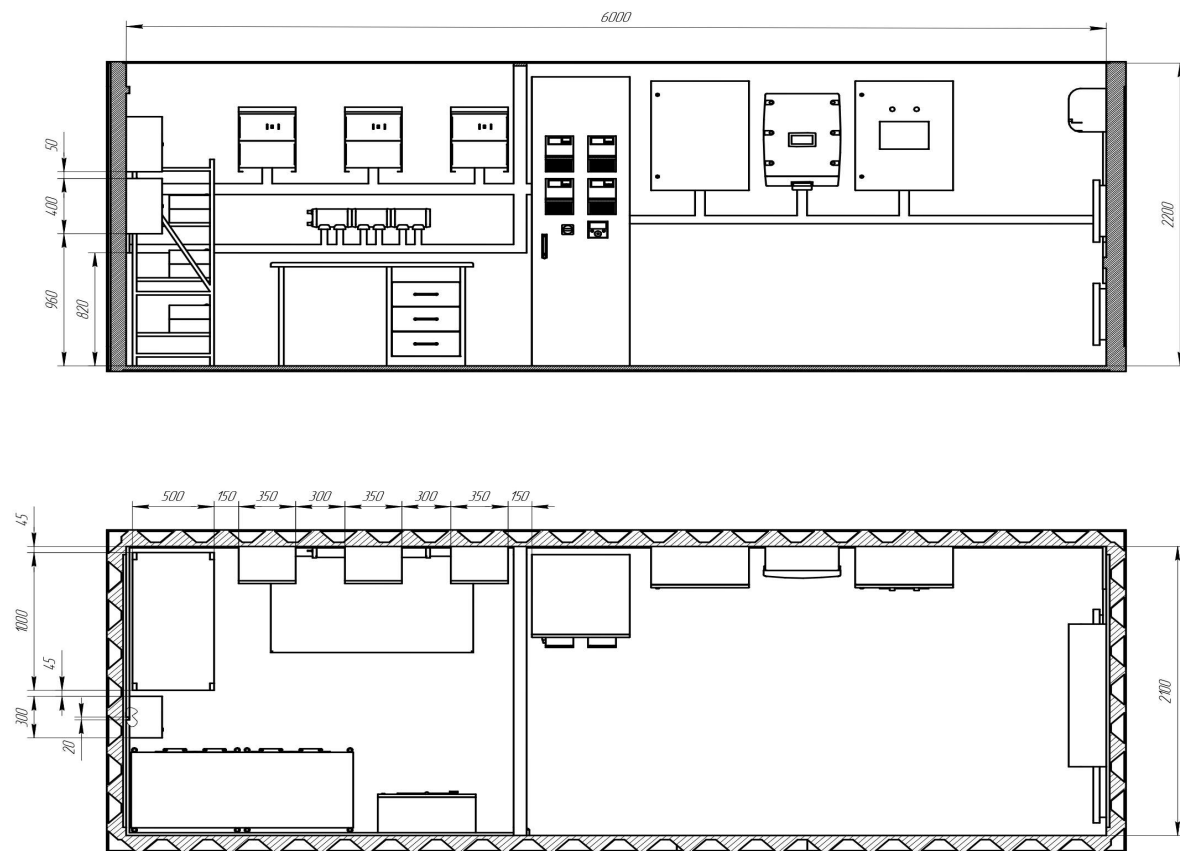
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Эскизная документация на гибридную систему накопления энергии

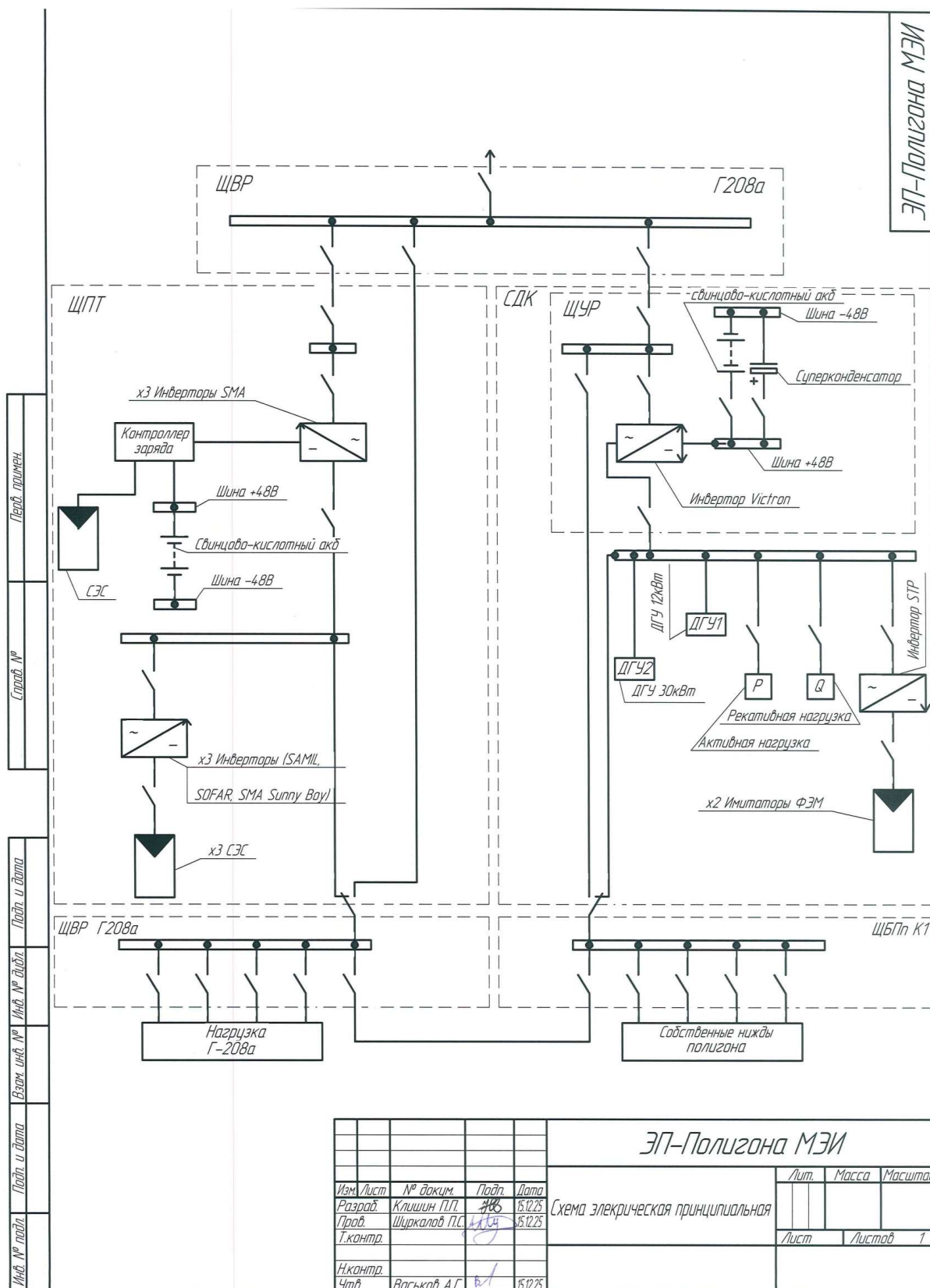
Перечень эскизной документации на гибридную СНЭ:

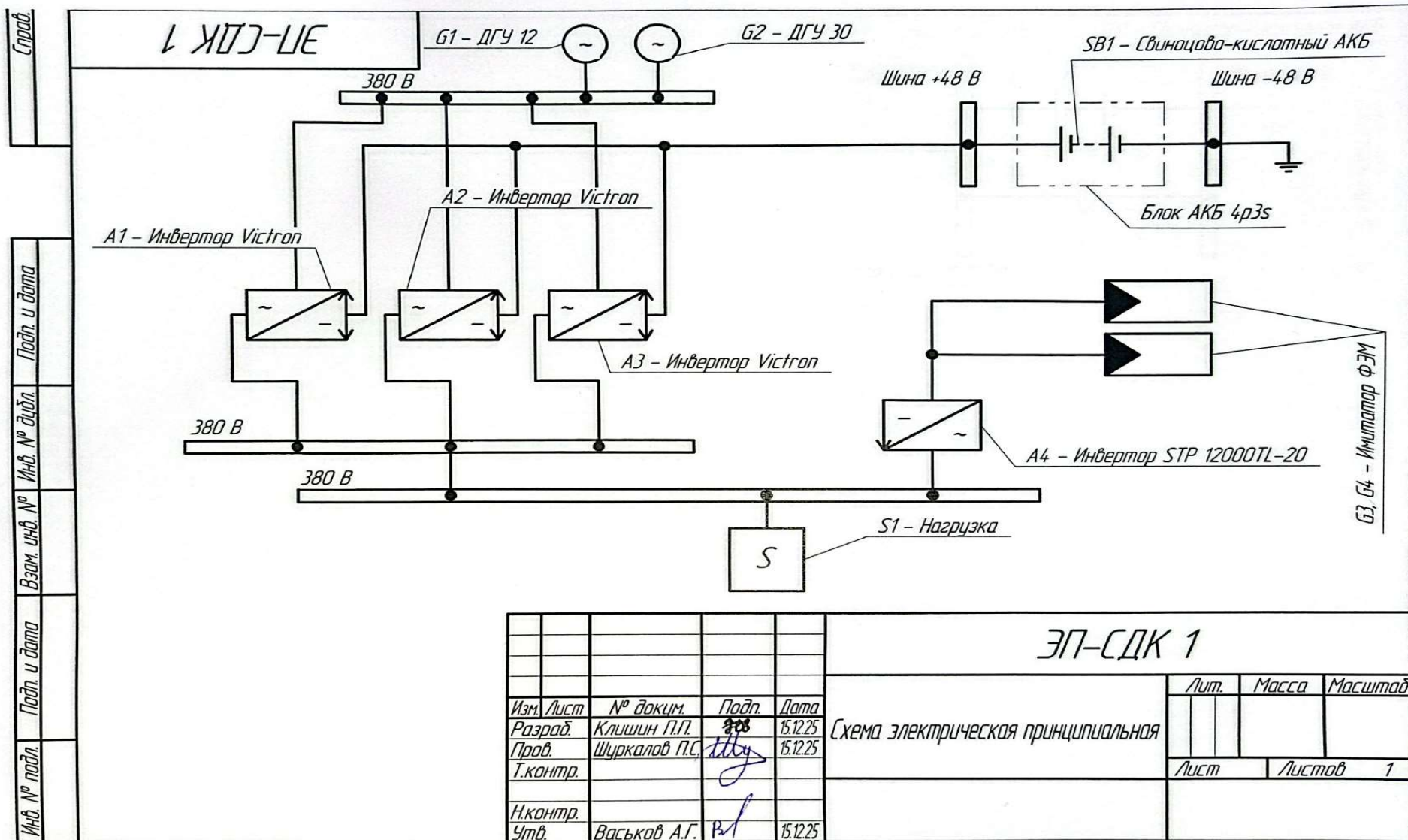
- 1) ВО-СДК 1 – Размещение оборудования СДК при СК в правой части контейнера;
- 2) ВО-СДК 2 – Размещение оборудования СДК при СК в левой части контейнера;
- 3) ЭП-Полигона – Схема электрическая принципиальная;
- 4) ЭП-СДК 1 – Схема электрическая принципиальная;
- 5) ЭП-СДК 2 – Схема электрическая принципиальная;
- 6) Э2-СДК 1 – Схема электрическая однолинейная;
- 7) Э2-СДК 2 – Схема электрическая однолинейная;
- 8) ЛС-СДК – Схема логическая.

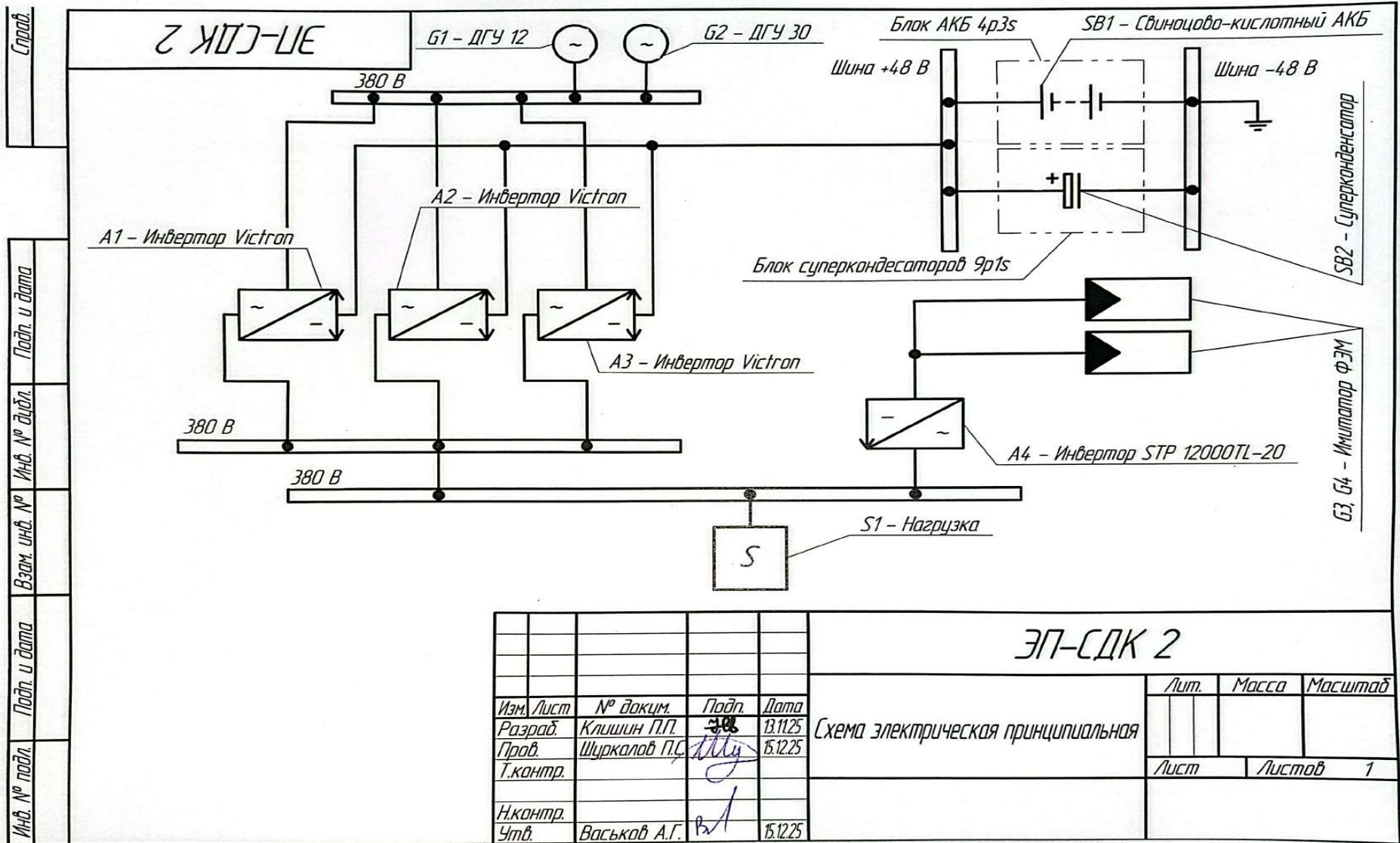


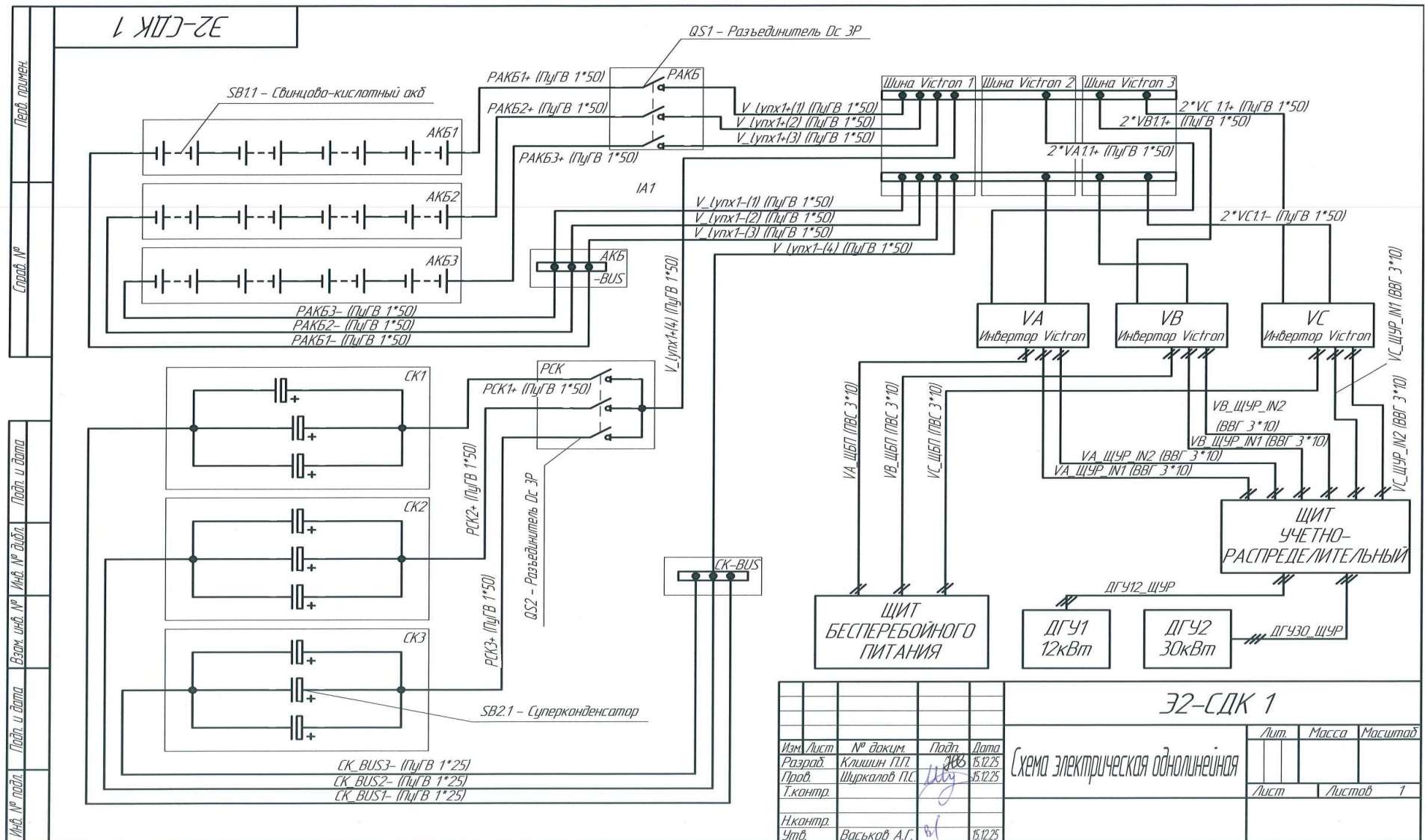
BO-CDK 2

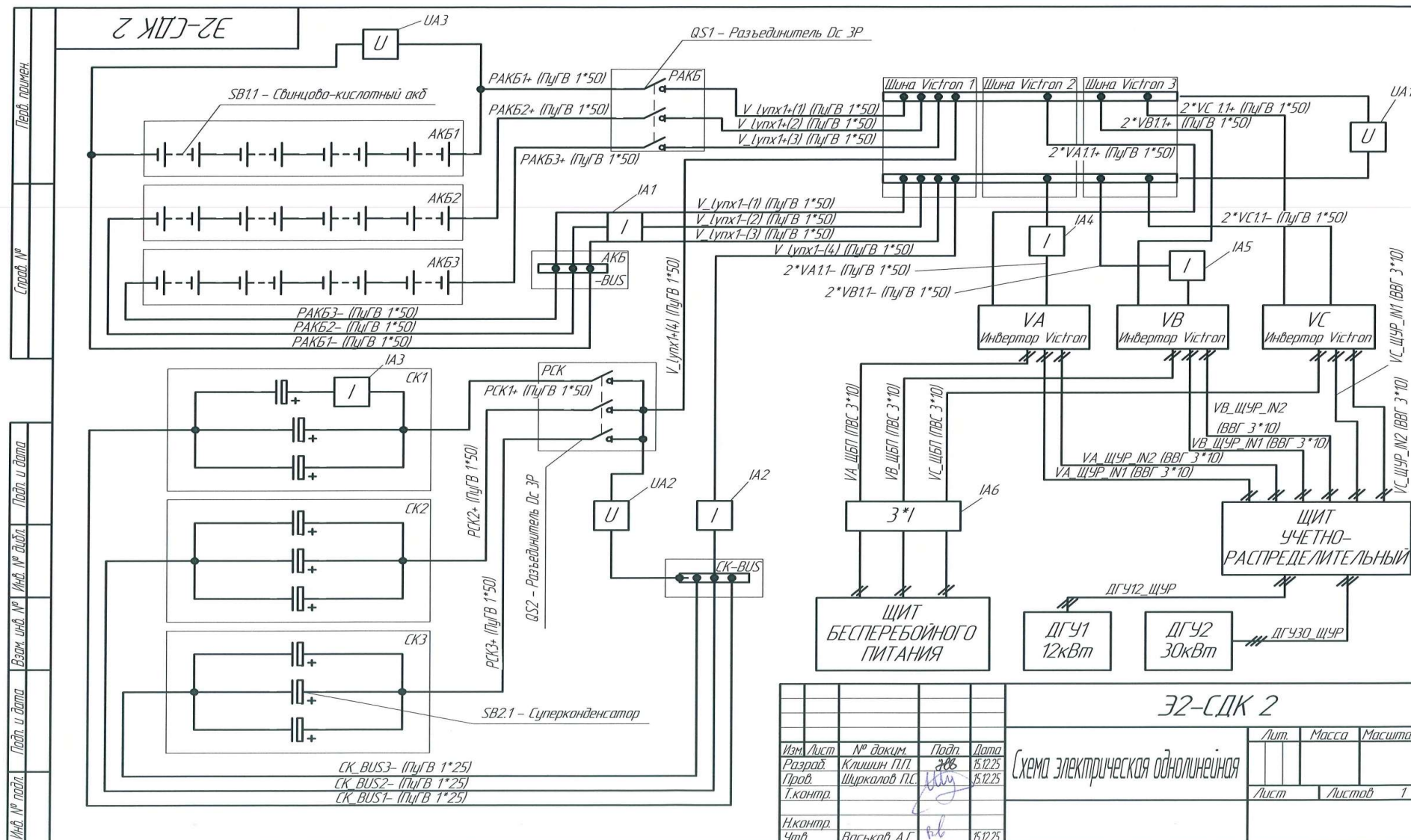
						ВО-СДК 2		
						Лист	Масса	Максимум
Изд.	Дост.	Г.И.Джиган	Дост.	Дост.	Размещение оборудования СДК при СК в левой части контейнера			1,20
Изд.	Дост.	Иванов А.А.	Дост.	Дост.				
Проб.	Дост.	Широкое П.С.	Дост.	Дост.				
Г.контр.						Лист	Дост.	Г
И.контр.								
Чит.		Васильев А.Г.	Вд	В.Д.С.	Копировал			Формат А2

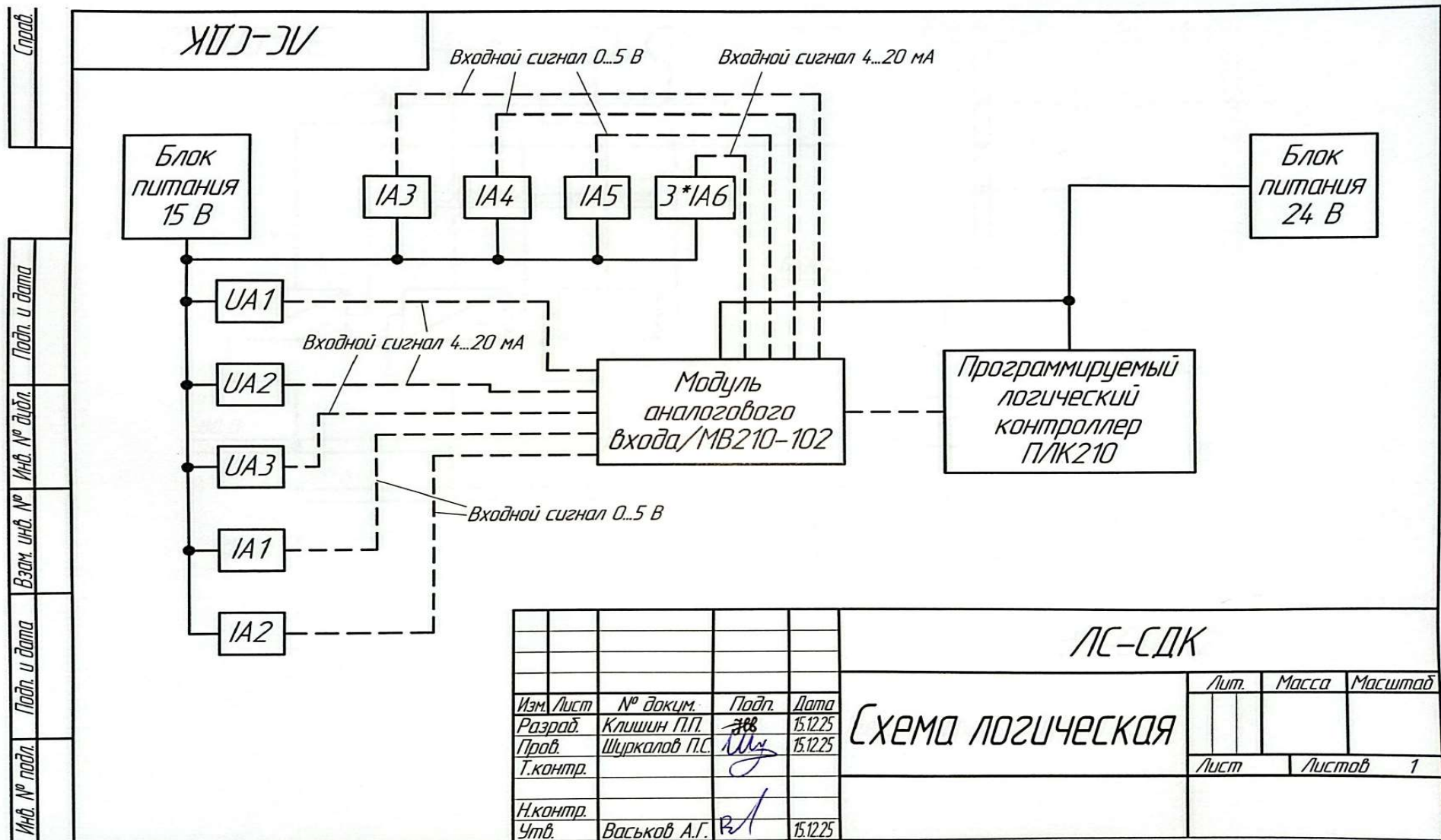












ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Программный код компонентов системы мониторинга и управления испытательного стенда «Гибридная СНЭ»

1) Программный компонент main_active_load.

```
import asyncio
import time
from Active_Load.Connected.load_connect import upsert_active_load_telemetry
from Connected.load_connect import ActiveLoad
from Connected.connection_db import add_user
from Active_Load.utils.utils import filter_bad
async def main():
    # Подключаемся к БД (если скрипт запускается на сервере с БД то - False)
    #(если скрипт запускается локально на ПК, а БД находится на сервере то - True)
    connect = add_user(device_flag=True) # если сервер БД в docker-сети, иначе True
    # Создаем клиента модуля активной нагрузки и подключаемся к нему по Modbus TCP
    load = ActiveLoad(' *.*.*.*.* ', port=502)
    await load.connect()
    try:
        # Запускаем бесконечный цикл опроса нагрузки
        while True:
            # Фиксируем время начала итерации
            start_time = time.perf_counter()
            try:
                # запись значений для поддержания соединения с модулем нагрузки
                await load.write_registers_to_hold_connection()
                # Читаем все необходимые регистры из модуля нагрузки
                values = await load.read_registers()
                print(values)
            except Exception as e:
                # если ошибка чтения → вывести сообщение
                print(f"Ошибка чтения Modbus: {e}")
                # Подождать 1 секунду
                await asyncio.sleep(1)
                # Продолжение для повтора попытки
```

```

        continue

    # Подготовим данные для записи в БД
    output = {} # создаем пустой словарь, куда будем складывать обработанные
параметры

    # проходим по всем парам ключ-значение, полученным из инвертора
    for k, v in values.items():
        try:
            # пытаемся взять только число из строки (если там есть единицы измерения)
            val = float(str(v).split()[0])

            # фильтруем «сломанные» значения, заменяя их на 0 при необходимости
            val = filter_bad(val)

            # Преобразуем название показателя к удобному "стандартному" виду для базы
данных:

            # 1) переводим все буквы в маленькие (например, "Voltage L1" → "voltage l1"),
            # 2) заменяем пробелы на нижнее подчеркивание (например, "voltage l1" →
            "voltage_l1").

            # Такой формат (с подчеркиваниями) называется snake_case
            # и используется для удобной работы с таблицами базы данных.
            db_key = k.lower().replace(' ', '_')

            # сохраняем обработанное значение в словарь по ключу
            output[db_key] = val
        except Exception:
            # если преобразование не удалось — выводим сообщение об ошибке
            print(f"Ошибка преобразования {k}: {v}")

            # пропускаем ошибки (данный показатель) и переходим к следующему
            continue

    # если словарь данных не пустой → пробуем записать в базу
    if output:
        try:
            # вызываем функцию вставки или обновления данных в таблице БД
            upsert_active_load_telemetry(connect, output)
        except Exception as e:
            # при ошибке записи выводим сообщение

```

```

        print(f"Ошибка при записи в БД: {e}")
        # Вычисляем длительность итерации (разница с моментом старта)
elapsed = time.perf_counter() - start_time
        # выводим заголовок с временем итерации
        print(f"\n=== Новые данные (за {elapsed:.3f} сек) ===")
        # выводим все пары ключ-значение из словаря data построчно
        for k, v in output.items():
            print(f"{k}: {v}")
        # Небольшая пауза (0.15 секунды) перед следующим опросом
        await asyncio.sleep(0.15) # Пауза между опросами
# обработка нажатия Ctrl+C для остановки программы (KeyboardInterrupt)
except KeyboardInterrupt:
    # Сообщаем пользователю, что программа остановлена
    print("Остановлено пользователем.")
finally:
    # Закрываем соединение с инвертором
    await load.disconnect()
    # если во время работы программы удалось подключиться к базе данных,
    # то перед завершением работы нужно закрыть соединение.
    # Это нужно для того, чтобы в базе не оставались "висящие" подключения
    # и чтобы система ресурсов работала правильно.
    if connect:
        connect.close()
# Этот блок запускает саму программу.
# Он срабатывает только тогда, когда мы запускаем этот файл напрямую,
# а не импортируем его как часть другой программы.
# Здесь вызывается основная функция main(),
# которая запускает весь цикл опроса инвертора и работу с базой данных.
if __name__ == '__main__':
    asyncio.run(main())

```

2) Программный компонент main_experiment_active_load.

```
import asyncio
from Connected.load_connect import ActiveLoad
from Experiment.Load_experiment import Scheduler
from Active_Load.utils.utils import encode_int16
async def sub ():
    # Создаем клиента модуля активной нагрузки и подключаемся к нему по Modbus TCP
    exp = ActiveLoad(' *.*.*.*.*', port=502)
    await exp.connect()
    # Формируем "расписание" эксперимента из файла формата .json при помощи
соответствующей функции
    # если параметр на входе None, то будет загружено тестовое "расписание"
    schedule_raw = Scheduler.find_and_form_schedule(None)
    # Производим проверку наличия в файле хотя бы одного значения
    if len(schedule_raw) > 0:
        # если проверка пройдена, то создаем словари уставок по мощности и по времени
        schedule_set_points = []
        schedule_time = []
        for schedule_item in schedule_raw:
            time_set = schedule_item['time']
            set_point_raw = schedule_item['set_point']
            schedule_time.append(time_set)
            schedule_set_points.append(set_point_raw)
    else:
        # если проверка не выполняется, то выполнение эксперимента прекращается
        print("Ошибка. Файл расписания пуст")
        exit()
    try:
        # Запускаем цикл отправки уставок нагрузки на устройство
        # Цикл выполняется для каждого элемента уставки из сформированного ранее
"расписания"
        for sp in schedule_set_points:
            i = schedule_set_points.index(sp)
```

```

time_set = schedule_time[i]

try:
    # Запись значений для поддержания соединения с модулем нагрузки
    await exp.write_registers_to_hold_connection()

    # Перевод значения уставки в формат 16-битного знакового числа
    set_point = encode_int16(sp)

    # Отправка значения на ПЛК модуля активной нагрузки
    await exp.write_registers(address=31, values=set_point, device_id=1)

    # Пауза в выполнении согласно временным уставкам
    await asyncio.sleep(time_set)

except Exception as e:
    # если ошибка чтения → вывести сообщение
    print(f"Ошибка чтения Modbus: {e}")

    # Подождать 1 секунду
    await asyncio.sleep(1)

    # Продолжение для повтора попытки
    continue

## обработка нажатия Ctrl+C для остановки программы (KeyboardInterrupt)
except KeyboardInterrupt:
    # Сообщаем пользователю, что программа остановлена
    print("Остановлено пользователем.")

finally:
    # Закрываем соединение с нагрузкой
    await exp.disconnect()

# Этот блок запускает саму программу.
# Он срабатывает только тогда, когда мы запускаем этот файл напрямую,
# а не импортируем его как часть другой программы.
# Здесь вызывается основная функция main(),
# которая запускает весь цикл опроса инвертора и работу с базой данных.
if __name__ == '__main__':
    asyncio.run(sub())

```

3) Программный компонент main_reactive_load.

```
import asyncio
import time
from Reactive_Load.Connected.load_connect import upsert_reactive_load_telemetry
from Connected.load_connect import ReactiveLoad
from Connected.connection_db import add_user
from Reactive_Load.utils.utils import filter_bad
async def main():
    # Подключаемся к БД (если скрипт запускается на сервере с БД то - False)
     #(если скрипт запускается локально на ПК,а БД находится на сервере то - True)
    connect = add_user(device_flag=True) # если сервер БД в docker-сети, иначе True
    # Создаем клиента модуля активной нагрузки и подключаемся к нему по Modbus TCP
    load = ReactiveLoad(' *.*.*.*.* ', port=502)
    await load.connect()
    try:
        # Запускаем бесконечный цикл опроса нагрузки
        while True:
            # Фиксируем время начала итерации
            start_time = time.perf_counter()
            print(start_time)
            try:
                # запись значений для поддержания соединения с модулем нагрузки
                await load.write_registers_to_hold_connection()
                # Читаем все необходимые регистры из модуля нагрузки
                values = await load.read_registers()
                print(values)
            except Exception as e:
                # если ошибка чтения → вывести сообщение
                print(f"Ошибка чтения Modbus: {e}")
                # Подождать 1 секунду
                await asyncio.sleep(1)
                # Продолжение для повтора попытки
                continue
```

```

# Подготовим данные для записи в БД
output = {} # создаем пустой словарь, куда будем складывать обработанные
параметры

# проходим по всем парам ключ-значение, полученным из инвертора
for k, v in values.items():
    try:
        # пытаемся взять только число из строки (если там есть единицы измерения)
        val = float(str(v).split()[0])
        # фильтруем «сломанные» значения, заменяя их на 0 при необходимости
        val = filter_bad(val)
        # Преобразуем название показателя к удобному "стандартному" виду для базы
        данных:
        # 1) переводим все буквы в маленькие (например, "Voltage L1" → "voltage l1"),
        # 2) заменяем пробелы на нижнее подчеркивание (например, "voltage l1" →
        "voltage_l1").
        # Такой формат (с подчеркиваниями) называется snake_case
        # и используется для удобной работы с таблицами базы данных.
        db_key = k.lower().replace(' ', '_')
        # сохраняем обработанное значение в словарь по ключу
        output[db_key] = val
    except Exception:
        # если преобразование не удалось — выводим сообщение об ошибке
        print(f"Ошибка преобразования {k}: {v}")
        # пропускаем ошибки (данный показатель) и переходим к следующему
        continue

# если словарь данных не пустой → пробуем записать в базу
if output:
    try:
        # вызываем функцию вставки или обновления данных в таблице БД
        upsert_reactive_load_telemetry(connect, output)
    except Exception as e:
        # при ошибке записи выводим сообщение
        print(f"Ошибка при записи в БД: {e}")

```

```

        # Вычисляем длительность итерации (разница с моментом старта)
elapsed = time.perf_counter() - start_time

# выводим заголовок с временем итерации
print(f"\n=== Новые данные (за {elapsed:.3f} сек) ===")

# выводим все пары ключ-значение из словаря data построчно
for k, v in output.items():
    print(f"{k}: {v}")

# Небольшая пауза (0.15 секунды) перед следующим опросом
await asyncio.sleep(0.15) # Пауза между опросами

# обработка нажатия Ctrl+C для остановки программы (KeyboardInterrupt)
except KeyboardInterrupt:
    # Сообщаем пользователю, что программа остановлена
    print("Остановлено пользователем.")
finally:
    # Закрываем соединение с инвертором
    await load.disconnect()

    # если во время работы программы удалось подключиться к базе данных,
    # то перед завершением работы нужно закрыть соединение.
    # Это нужно для того, чтобы в базе не оставались "висящие" подключения
    # и чтобы система ресурсов работала правильно.

    if connect:
        connect.close()

# Этот блок запускает саму программу.
# Он срабатывает только тогда, когда мы запускаем этот файл напрямую,
# а не импортируем его как часть другой программы.
# Здесь вызывается основная функция main(),
# которая запускает весь цикл опроса инвертора и работу с базой данных.
if __name__ == '__main__':
    asyncio.run(main())

```

4) Программный компонент main_experiment_reactive_load.

```
import asyncio
import time
from Reactive_Load.Connected.load_connect import upsert_reactive_load_telemetry
from Connected.load_connect import ReactiveLoad
from Connected.connection_db import add_user
from Reactive_Load.utils.utils import filter_bad
async def main():
    # Подключаемся к БД (если скрипт запускается на сервере с БД то - False)
     #(если скрипт запускается локально на ПК, а БД находится на сервере то - True)
    connect = add_user(device_flag=True) # если сервер БД в docker-сети, иначе True
    # Создаем клиента модуля активной нагрузки и подключаемся к нему по Modbus TCP
    load = ReactiveLoad(' *.*.*.*.* ', port=502)
    await load.connect()
    try:
        # Запускаем бесконечный цикл опроса нагрузки
        while True:
            # Фиксируем время начала итерации
            start_time = time.perf_counter()
            print(start_time)
            try:
                # запись значений для поддержания соединения с модулем нагрузки
                await load.write_registers_to_hold_connection()
                # Читаем все необходимые регистры из модуля нагрузки
                values = await load.read_registers()
                print(values)
            except Exception as e:
                # если ошибка чтения → вывести сообщение
                print(f"Ошибка чтения Modbus: {e}")
                # Подождать 1 секунду
                await asyncio.sleep(1)
                # Продолжение для повтора попытки
                continue
```

```

# Подготовим данные для записи в БД
output = {} # создаем пустой словарь, куда будем складывать обработанные
параметры

# проходим по всем парам ключ-значение, полученным из инвертора
for k, v in values.items():
    try:
        # пытаемся взять только число из строки (если там есть единицы измерения)
        val = float(str(v).split()[0])
        # фильтруем «сломанные» значения, заменяя их на 0 при необходимости
        val = filter_bad(val)
        # Преобразуем название показателя к удобному "стандартному" виду для базы
        данных:

        # 1) переводим все буквы в маленькие (например, "Voltage L1" → "voltage l1"),
        # 2) заменяем пробелы на нижнее подчеркивание (например, "voltage l1" →
        "voltage_l1").

        # Такой формат (с подчеркиваниями) называется snake_case
        # и используется для удобной работы с таблицами базы данных.
        db_key = k.lower().replace(' ', '_')
        # сохраняем обработанное значение в словарь по ключу
        output[db_key] = val
    except Exception:
        # если преобразование не удалось — выводим сообщение об ошибке
        print(f"Ошибка преобразования {k}: {v}")
        # пропускаем ошибки (данный показатель) и переходим к следующему
        continue

# если словарь данных не пустой → пробуем записать в базу
if output:
    try:
        # вызываем функцию вставки или обновления данных в таблице БД
        upsert_reactive_load_telemetry(connect, output)
    except Exception as e:
        # при ошибке записи выводим сообщение
        print(f"Ошибка при записи в БД: {e}")

```

```

        # Вычисляем длительность итерации (разница с моментом старта)
elapsed = time.perf_counter() - start_time

# выводим заголовок с временем итерации
print(f"\n=== Новые данные (за {elapsed:.3f} сек) ===")

# выводим все пары ключ-значение из словаря data построчно
for k, v in output.items():
    print(f"{k}: {v}")

# Небольшая пауза (0.15 секунды) перед следующим опросом
await asyncio.sleep(0.15) # Пауза между опросами

# обработка нажатия Ctrl+C для остановки программы (KeyboardInterrupt)
except KeyboardInterrupt:
    # Сообщаем пользователю, что программа остановлена
    print("Остановлено пользователем.")
finally:
    # Закрываем соединение с инвертором
    await load.disconnect()

    # если во время работы программы удалось подключиться к базе данных,
    # то перед завершением работы нужно закрыть соединение.
    # Это нужно для того, чтобы в базе не оставались "висящие" подключения
    # и чтобы система ресурсов работала правильно.

    if connect:
        connect.close()

# Этот блок запускает саму программу.
# Он срабатывает только тогда, когда мы запускаем этот файл напрямую,
# а не импортируем его как часть другой программы.
# Здесь вызывается основная функция main(),
# которая запускает весь цикл опроса инвертора и работу с базой данных.
if __name__ == '__main__':
    asyncio.run(main())

```

5) Программный компонент main_emulator.py.

Импортируем необходимые модули и функции для работы с базой данных, MQTT, эмуляторами и командными операциями.

```
import time
from Connected.connection_db import add_user
from Connected.contact_mqtt import connection
from Connected.emulators_connect import ContactEmulators
from Emulators.emulators_command import CommandEmulators
from Emulators.emulators_callback import EmCallback
from Request.command_operator import Command
from utils.create_file_and_path import Util
from utils.publish import Publish
import telemetry.main_em_telemetry as main_em_telemetry
import control.main_control_emulator as main_control_emulator
def init_start():
    # Устанавливаем соединение с MQTT-брокером
    mqttc = connection()
    # Подключаемся к БД
    connect = add_user(False)
    # Инициализируем объект для обработки команд
    operator = Command(mqttc, connect)
    # Инициализируем объект для работы с файловыми путями и данными
    data_path = Util()
    # Создаем объект для публикации данных в MQTT
    publish = Publish(mqttc)
    # Устанавливаем соединение с первым эмулятором
    emulators_contact_one = ContactEmulators("EM_ONE")
    emulators_contact_one.connection_sim(data_path.get_data_path("setting.ini"))
    emulators_command_one = CommandEmulators(emulators_contact_one.socket)
    emulators_callback_one = EmCallback(mqttc, emulators_contact_one,
emulators_command_one)
    # Устанавливаем соединение со вторым эмулятором
    emulators_contact_two = ContactEmulators("EM_TWO")
```

```

emulators_contact_two.connection_sim(data_path.get_data_path("setting.ini"))
emulators_command_two = CommandEmulators(emulators_contact_two.socket)
emulators_callback_two = EmCallback(mqtts, emulators_contact_two,
emulators_command_two)

# Отправляем в MQTT информацию о сокетах эмуляторов
publish.push_name_socket(emulators_contact_one, "em_1")
publish.push_name_socket(emulators_contact_two, "em_2")
# Получаем параметры для эмуляторов из базы данных
em_param = operator.get_param_em(tables="PV_module_source")
# Отправляем команды на настройку параметров первого эмулятора
emulators_callback_one.push_command({
    "SYST:INT:SIM:SET VOC_STC,": em_param[1],
    "SYST:INT:SIM:SET ISC_STC,": em_param[2],
    "SYST:INT:SIM:SET VMPP_STC,": em_param[3],
    "SYST:INT:SIM:SET IMPP_STC,": em_param[4],
    "SYST:INT:SIM:SET ALPHA,": em_param[5],
    "SYST:INT:SIM:SET BETA,": em_param[6],
    "SYST:INT:SIM:SET TSTC,": em_param[15],
    "SYST:INT:SIM:SET GSTC,": em_param[16]
})
print() # Выводим пустую строку для разделения вывода
# Отправляем команды на настройку параметров второго эмулятора
emulators_callback_two.push_command({
    "SYST:INT:SIM:SET VOC_STC,": em_param[1],
    "SYST:INT:SIM:SET ISC_STC,": em_param[2],
    "SYST:INT:SIM:SET VMPP_STC,": em_param[3],
    "SYST:INT:SIM:SET IMPP_STC,": em_param[4],
    "SYST:INT:SIM:SET ALPHA,": em_param[5],
    "SYST:INT:SIM:SET BETA,": em_param[6],
    "SYST:INT:SIM:SET TSTC,": em_param[15],
    "SYST:INT:SIM:SET GSTC,": em_param[16]
})
print() # Выводим пустую строку для разделения вывода

```

```

# Получаем обратную связь от первого и второго эмуляторов
emulators_callback_one.callback_data()
emulators_callback_two.callback_data()
# print(operator.check_connections("all_complex"))
# print(operator.check_connections("emulators"))
# Основной цикл для обработки команд управления эмуляторами
while True:
    # Проверяем состояние всех подключений
    while operator.check_connections("all_complex"):
        # Проверяем состояние сокетов
        if not emulators_contact_one.socket_works():
            print("Эмулятор 1 не отвечает! Переподключение...")
            try:
                emulators_contact_one.connection_sim(data_path.get_data_path("setting.ini"))
                emulators_command_one = CommandEmulators(emulators_contact_one.socket)
                emulators_callback_one = EmCallback(mqtcc, emulators_contact_one,
emulators_command_one)
            except Exception as e:
                print("Ошибка переподключения эмулятора 1:", e)
                time.sleep(2)
                continue # Можно пробовать снова в следующей итерации

        if not emulators_contact_two.socket_works():
            print("Эмулятор 2 не отвечает! Переподключение...")
            try:
                emulators_contact_two.connection_sim(data_path.get_data_path("setting.ini"))
                emulators_command_two = CommandEmulators(emulators_contact_two.socket)
                emulators_callback_two = EmCallback(mqtcc, emulators_contact_two,
emulators_command_two)
            except Exception as e:
                print("Ошибка переподключения эмулятора 2:", e)
                time.sleep(2)
                continue

```

```

try:
    main_em_telemetry.em_telemetry(publish=publish,
                                    emulators_contact_one=emulators_contact_one,
                                    emulators_contact_two=emulators_contact_two,
                                    operator=operator)

except Exception as ex:
    print(f"[ERROR] Ошибка в main_em_telemetry: {ex}")
    time.sleep(2) # Дай немного времени на восстановление
    continue

# Проверка на запуск скрипта ДГУ
if operator.check_connections("emulators"):
    print('Разрешено')
    main_em_telemetry.em_telemetry(publish=publish,
                                    emulators_contact_one=emulators_contact_one,
                                    emulators_contact_two=emulators_contact_two,
                                    operator=operator)

    if operator.check_connections("emulator_1"):
main_control_emulator.control_emulator_1(emulators_callback_one=emulators_callback_one,
                                           operator=operator)

    else:
        emulators_callback_one.command_processing_em(False, "SYST:INT:SIM:SET
GPV,", 0)

    if operator.check_connections("emulator_2"):
main_control_emulator.control_emulator_2(emulators_callback_two=emulators_callback_two,
                                           operator=operator)

    else:
        emulators_callback_two.command_processing_em(False, "SYST:INT:SIM:SET
GPV,", 0)

    else:
        print('Запрет')
        # если управление эмуляторами отключено, посылаем команду отключения
        emulators_callback_one.command_processing_em(False, "SYST:INT:SIM:SET
GPV,", 0)

```

```

        emulators_callback_two.command_processing_em(False, "SYST:INT:SIM:SET
GPV", 0)
    else:
        print('Красная кнопка')
        # Отключаем эмуляторы и закрываем соединения, если управление всеми
эмуляторами остановлено
        emulators_callback_one.command_processing_em(False, "OUTPUT, ", 0)
        emulators_callback_two.command_processing_em(False, "OUTPUT, ", 0)
        emulators_contact_one.close_socket() # Закрываем сокет для первого эмулятора
        emulators_contact_two.close_socket() # Закрываем сокет для второго эмулятора
        break
if __name__ == '__main__':
    # Запускаем основную функцию при запуске скрипта
    init_start()

```

6) Программный компонент main_em_telemetry.py.

```
def em_telemetry(emulators_contact_one, emulators_contact_two, operator, publish):  
    # Получаем данные от эмуляторов и публикуем их через MQTT  
    emulators_contact_one.get_data_emulators()  
    emulators_contact_two.get_data_emulators()  
    publish.publish_data_emulators(emulators_contact_one)  
    publish.publish_data_emulators(emulators_contact_two)  
    print(emulators_contact_one.get_data_emulators())  
    # Обновляем параметры для первого эмулятора в базе данных  
    c = ["power_emulator_1", "voltage_emulator_1", "current_emulator_1"]  
    operator.update_param_em([  
        emulators_contact_one.power,  
        emulators_contact_one.result[0],  
        emulators_contact_one.result[1]  
    ], c)  
    # Обновляем параметры для второго эмулятора в базе данных  
    c = ["power_emulator_2", "voltage_emulator_2", "current_emulator_2"]  
    operator.update_param_em([  
        emulators_contact_two.power,  
        emulators_contact_two.result[0],  
        emulators_contact_two.result[1]  
    ], c)  
    # Обновляем суммарные параметры для обоих эмуляторов в базе данных  
    c = ['power_total', 'voltage_total', 'current_total']  
    operator.update_param_em([  
        float(emulators_contact_one.power) + float(emulators_contact_two.power),  
        float(emulators_contact_one.result[0]),  
        float(emulators_contact_one.result[1]) + float(emulators_contact_two.result[1])  
    ], c)
```

7) Программный компонент main_victron.py.

```
import asyncio
from asyncio import CancelledError # Импортируем ошибку для обработки отмены задач
from Connected.contact_mqtt import connection # Импортируем функцию для подключения
к MQTT
from Victron.victron_contact import VictronCommand # Импортируем команду для работы
с Victron
from utils.create_file_and_path import Util # Импортируем утилиту для работы с файлами
и путями
from Connected.connection_db import add_user # Импортируем функцию для добавления
пользователя в базу данных
from Request.command_operator import Command # Импортируем класс для обработки
команд
# Асинхронная функция для регулярного опроса данных Victron с интервалом в 15 секунд
async def delay(victron):
    while True:
        victron.survey_victron() # Выполняем опрос данных от Victron
        await asyncio.sleep(15) # Приостанавливаем выполнение на 15 секунд
# Асинхронная функция для инициализации и запуска основного цикла программы
async def init_start():
    mqttc = connection() # Устанавливаем соединение с MQTT-брокером
    #Аргумент функции add_user показывает откуда производим подключение (True -
внешняя сеть; False - внутри network оркестратора)
    connect = add_user(False) # Добавляем пользователя в базу данных
    operator = Command(mqttc, connect) # Создаем объект для обработки команд
    data_path = Util() # Инициализируем объект для работы с файловыми путями и
данными
    victron = VictronCommand(mqttc) # Создаем объект для работы с командами Victron
    # Загружаем и устанавливаем данные для обратного вызова Victron из JSON файла
    victron.callback_data(data_path.open_json("data_topics_victron.json"))
    # Создаем асинхронную задачу для регулярного опроса данных от Victron
    survey = asyncio.create_task(delay(victron))
    # Основной цикл программы: обновляем параметры Victron в базе данных
```

```

while not survey.done(): # Пока задача опроса не завершена
    operator.update_param_victron(
        list(victron.dict_msg.keys()), list(victron.dict_msg.values())) # Обновляем параметры в
базе данных
    await asyncio.sleep(1) # Приостанавливаем выполнение на 1 секунду
try:
    await survey # Ожидаем завершения задачи опроса
except CancelledError: # Обрабатываем случай, если задача была отменена
    print('Задача survey была снята')
if __name__ == '__main__':
    asyncio.run(init_start()) # Запускаем асинхронную функцию init_start в качестве
основной

```

8) Программный код компонента main_sma.py.

```
import asyncio
import time
from Connected.Sma_connect import SMAClient, upsert_sma_telemetry
from Connected.connection_db import add_user
from utils.Sma_modbus_utils import filter_bad
async def main():
    # Подключаемся к БД (если скрипт запускается на сервере с БД то - False)
    # (если скрипт запускается локально на ПК, а БД находится на сервере то - True)
    connect = add_user(device_flag=False) # если сервер БД в docker-сети, иначе True
    # Создаем клиента SMA и подключаемся к нему по Modbus TCP
    sma = SMAClient('**.*.***.***', port=502)
    await sma.connect()
    try:
        # Запускаем бесконечный цикл опроса инвертора
        while True:
            # Аксируем время начала итерации
            start_time = time.perf_counter()
            try:
                # Читаем все регистры из инвертора
                values = await sma.read_all_registers()
            except Exception as e:
                # если ошибка чтения → вывести сообщение
                print(f"Ошибка чтения Modbus: {e}")
                # Подождать 1 секунду
                await asyncio.sleep(1)
                # Продолжение для повтора попытки
                continue
            # Подготовим данные для записи в БД
            data = {} # создаем пустой словарь, куда будем складывать обработанные параметры
            # проходим по всем парам ключ-значение, полученным из инвертора
            for k, v in values.items():
                try:
```

```

# пытаемся взять только число из строки (если там есть единицы измерения)
val = float(str(v).split()[0])

# фильтруем «сломанные» значения, заменяя их на 0 при необходимости
val = filter_bad(val)

# Преобразуем название показателя к удобному "стандартному" виду для базы
данных:

# 1) переводим все буквы в маленькие (например, "Voltage L1" → "voltage l1"),
# 2) заменяем пробелы на нижнее подчеркивание (например, "voltage l1" →
"voltage_l1").

# Такой формат (с подчеркиваниями) называется snake_case
# и используется для удобной работы с таблицами базы данных.
db_key = k.lower().replace(' ', '_')

# сохраняем обработанное значение в словарь по ключу
data[db_key] = val

except Exception:

    # если преобразование не удалось — выводим сообщение об ошибке
    print(f"Ошибка преобразования {k}: {v}")

    # пропускаем ошибки ( данный показатель) и переходим к следующему
    continue

# если словарь данных не пустой → пробуем записать в базу
if data:

    try:

        # вызываем функцию вставки или обновления данных в таблице БД
        upsert_sma_telemetry(connect, data)

    except Exception as e:

        # при ошибке записи выводим сообщение
        print(f"Ошибка при записи в БД: {e}")

# Вычисляем длительность итерации (разница с моментом старта)
elapsed = time.perf_counter() - start_time

# выводим заголовок с временем итерации
print(f"\n=== Новые данные (за {elapsed:.3f} сек) ===")

# выводим все пары ключ-значение из словаря data построчно
for k, v in data.items():

```

```

    print(f'{k}: {v}')
    # Небольшая пауза (0.15 секунды) перед следующим опросом
    await asyncio.sleep(0.15) # Пауза между опросами
# обработка нажатия Ctrl+C для остановки программы (KeyboardInterrupt)
except KeyboardInterrupt:
    # Сообщаем пользователю, что программа остановлена
    print("Остановлено пользователем.")
finally:
    # Закрываем соединение с инвертором
    await sma.disconnect()
    # если во время работы программы удалось подключиться к базе данных,
    # то перед завершением работы нужно закрыть соединение.
    # Это нужно для того, чтобы в базе не оставались "висящие" подключения
    # и чтобы система ресурсов работала правильно.
    if connect:
        connect.close()
# Этот блок запускает саму программу.
# Он срабатывает только тогда, когда мы запускаем этот файл напрямую,
# а не импортируем его как часть другой программы.
# Здесь вызывается основная функция main(),
# которая запускает весь цикл опроса инвертора и работу с базой данных.
if __name__ == '__main__':
    asyncio.run(main())

```

9) Программный код компонента connection_db.py.

```
import configparser # Импортируем модуль для работы с конфигурационными файлами
import os
from utils.create_file_and_path import Util # Импортируем утилиту для работы с файлами
и путями
import pymysql # Импортируем модуль для работы с MySQL
from pymysql.cursors import DictCursor # Импортируем DictCursor для работы с
результатами запросов как со словарями
def add_user(device_flag):
    # Создаем объект ConfigParser для чтения конфигурационного файла
    config = Util().config_pars('setting.ini')
    # Проверяем устройство с которого идет запрос (True - Raspberry Pi, False - Debian
Server
    if device_flag:
        host = config['BD']['HOST']
        user = config['BD']['USER']
        password = config['BD']['PASSWORD']
        BD = config['BD']['BD_NAME']
        port = int(config['BD']['PORT'])
    else:
        host = config['BD_DOCKER_NETWORK']['HOST']
        user = config['BD_DOCKER_NETWORK']['USER']
        password = config['BD_DOCKER_NETWORK']['PASSWORD']
        BD = config['BD_DOCKER_NETWORK']['BD_NAME']
        port = int(config['BD_DOCKER_NETWORK']['PORT'])
    try:
        # Устанавливаем соединение с базой данных с использованием предоставленных
данных
        connect = pymysql.connect(
            host = host, # Адрес сервера базы данных
            port = port, # Порт для подключения по умолчанию этот порт занимает БД
            user = user, # Имя пользователя
            password = password, # Пароль пользователя
```

```

        cursorclass = DictCursor, # Используем DictCursor для получения данных в виде
словарей
        database = BD, # Название базы данных
        autocommit = True # Включаем автоматическое подтверждение транзакций
    )
    print('Подключение к базе данных прошло успешно')
    print('-----')
    return connect # Возвращаем объект подключения
except Exception as e: # Вызываем исключения при неудачном подключении
    print("Подключение не удалось") # Сообщаем о неудачном подключении
    print(e) # Выводим информацию об ошибке

```

10) Программный код компонента utils.py.

```
import struct

def decode_int16(response):
    output = response[0].to_bytes(2, byteorder='big')
    return struct.unpack('>h', output)[0]

def decode_uint16(response):
    output = response[0].to_bytes(2, byteorder='big')
    return struct.unpack('>h', output)[0]

def decode_int32(response):
    output = b''.join(r.to_bytes(2, byteorder='big') for r in response)
    return struct.unpack('>i', output)[0]

def decode_uint32(response):
    output = b''.join(r.to_bytes(2, byteorder='big') for r in response)
    return struct.unpack('>I', output)[0]

DECODER_MAP = {
    's16': decode_int16,
    'u16': decode_uint16,
    's32': decode_int32,
    'u32': decode_uint32,
    'f32': decode_float32,
}

def decode_fix(value, decimals):
    """
    Преобразует значение в формат FIXn:
    это деление на 10^n, чтобы убрать "лишние нули".
    Например: value=1234, decimals=2 → 12.34
    """
    return value / (10 ** decimals) if decimals else value

# === НАБОР «ПЛОХИХ» ЗНАЧЕНИЙ ===
# Иногда инвертор может возвращать неверные данные (сломанные коды ошибок).
# Эти значения заранее известны и занесены в список BAD_VALUES
BAD_VALUES = {
```

```

-2147483648, # битое знаковое 32-битное
-2147483.648, # если твой float декодит из этих int
42949672.95, # битый float (например, 0xFFFFFFFF в float32)
4294967.295,
-21474836.48,
}

# === ФУНКЦИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ПЛОХИХ ЗНАЧЕНИЙ ===
def filter_bad(val):
    """
    Проверяет, является ли значение "битым".
    если оно не число или совпадает (или очень близко) с плохими значениями → вернуть 0.
    Иначе вернуть исходное число.
    """
    try:
        # Пробуем перевести входное значение в число с плавающей точкой
        fval = float(val)
        # если число прямо совпадает с одним из "плохих" — обнуляем
        if fval in BAD_VALUES:
            return 0.0
        # если число отличается от "плохих" совсем чуть-чуть (менее чем на 0.01) → тоже
        обнуляем
        for bad in BAD_VALUES:
            if abs(fval - bad) < 1e-2: # допуск
                return 0.0
        # Иначе возвращаем как есть
        return fval
    except Exception:
        # если вообще не удалось преобразовать в число — возвращаем 0
        return 0.0

def encode_int16(value):
    """
    Преобразует знаковое целое в один 16-битный регистр (Big Endian) в диапазоне (от

```

-32768 до 32767).

Формат *Big Endian* — старший байт идет первым.

```
"""
# Приводим входное значение к int (на случай, если пришел float или строка с числом)
v = int(value)
# Проверяем, что число укладывается в диапазон знакового 16-битного int
if v < -32768 or v > 32767:
    raise ValueError("encode_int16: value out of range (-32768..32767)")
# Упаковываем число v в 2 байта как знаковое 16-битное ('>h' — big-endian, signed
short)
data = struct.pack('>h', v)
# Превращаем 2 байта обратно в одно 16-битное слово (целое число 0..65535),
# которое и нужно записывать в Modbus-регистр
return [int.from_bytes(data, byteorder='big')]
def encode_uint16(value):
    """
    Преобразует беззнаковое целое в один 16-битный регистр (от 0 до 65535).
    """
    # Приводим входное значение к int
    v = int(value)
    # Проверяем, что число в диапазоне беззнакового 16-битного int
    if v < 0 or v > 0xFFFF:
        raise ValueError("encode_uint16: value out of range (0..65535)")
    # Упаковываем число v в 2 байта как беззнаковое 16-битное ('>H' — big-endian,
unsigned short)
    data = struct.pack('>H', v)
    # Превращаем байты в одно 16-битное слово (0..65535) для записи в Modbus-регистр
    return [int.from_bytes(data, byteorder='big')]
def encode_int32(value):
    """
    Преобразует знаковое 32-битное целое в два 16-битных регистра.
    регистры = [старшее_слово, младшее_слово]
    """
```

```

# Приводим входное значение к int
v = int(value)

# Проверяем, что число укладывается в диапазон знакового 32-битного int
if v < -0x80000000 or v > 0x7FFFFFFF:
    raise ValueError("encode_int32: value out of range")

# Упаковываем число v в 4 байта как знаковое 32-битное ('>i' — big-endian, signed int)
data = struct.pack('>i', v)

# Берем первые 2 байта — это старшее слово (high word)
hi = int.from_bytes(data[0:2], byteorder='big')

# Берем вторые 2 байта — это младшее слово (low word)
lo = int.from_bytes(data[2:4], byteorder='big')

# Возвращаем два 16-битных регистра: сначала старшее слово, потом младшее
return [hi, lo]

def encode_uint32(value):
    """
    Преобразует беззнаковое 32-битное целое в два регистра.
    регистры = [старшее_слово, младшее_слово]
    """

    # Приводим входное значение к int
    v = int(value)

    # Проверяем, что число в диапазоне беззнакового 32-битного int
    if v < 0 or v > 0xFFFFFFFF:
        raise ValueError("encode_uint32: value out of range")

    # Упаковываем число v в 4 байта как беззнаковое 32-битное ('>I' — big-endian, unsigned
    int)
    data = struct.pack('>I', v)

    # Первые 2 байта → старшее слово (high word)
    hi = int.from_bytes(data[0:2], byteorder='big')

    # Следующие 2 байта → младшее слово (low word)
    lo = int.from_bytes(data[2:4], byteorder='big')

    # Возвращаем список из двух регистров [старшее, младшее]
    return [hi, lo]

def encode_uint64(value):

```

```

"""
Преобразует беззнаковое 64-битное целое в четыре регистра.
регистры=[самое старшее, следующие старшие, следующие младшие, самое
младшие].
"""

# Приводим входное значение к int
v = int(value)

# Проверяем, что число в диапазоне беззнакового 64-битного int
if v < 0 or v > 0xFFFFFFFFFFFFFFFF:
    raise ValueError("encode_uint64: value out of range")

# Упаковываем число v в 8 байт как беззнаковое 64-битное ('>Q' — big-endian, unsigned
long long)
data = struct.pack('>Q', v)

# Разбиваем 8 байт на 4 слова по 2 байта
# hi_hi — самое старшее слово (старшие 16 бит всего числа)
hi_hi = int.from_bytes(data[0:2], 'big')
# hi_lo — следующие старшие 16 бит
hi_lo = int.from_bytes(data[2:4], 'big')
# lo_hi — следующие младшие 16 бит
lo_hi = int.from_bytes(data[4:6], 'big')
# lo_lo — самое младшее слово (младшие 16 бит всего числа)
lo_lo = int.from_bytes(data[6:8], 'big')

# Возвращаем четыре 16-битных регистра в порядке от самого старшего к самому
младшему
return [hi_hi, hi_lo, lo_hi, lo_lo]

def encode_int64(value):
    """
    Преобразует знаковое 64-битное целое в четыре 16-битных регистра.
    регистры = [самое старшее, следующие старшие, следующие младшие, самое
    младшие].
    """

    # Приводим входное значение к int (на случай float/строки)
    v = int(value)

```

```

# Проверяем, что число укладывается в диапазон знакового 64-битного int
# Диапазон S64: от -2^63 до 2^63 - 1
if v < -0x8000000000000000 or v > 0x7FFFFFFFFFFFFFFF:
    raise ValueError("encode_int64: value out of range")
# Упаковываем число v в 8 байт как знаковое 64-битное ('>q' — big-endian, signed long
long)
data = struct.pack('>q', v)
# Разбиваем 8 байт на 4 слова по 2 байта
# hi_hi — самое старшее слово (старшие 16 бит всего числа)
hi_hi = int.from_bytes(data[0:2], 'big')
# hi_lo — следующие старшие 16 бит
hi_lo = int.from_bytes(data[2:4], 'big')
# lo_hi — следующие младшие 16 бит
lo_hi = int.from_bytes(data[4:6], 'big')
# lo_lo — самое младшее слово (младшие 16 бит всего числа)
lo_lo = int.from_bytes(data[6:8], 'big')
# Возвращаем четыре 16-битных регистра в порядке от самого старшего к самому
младшему
return [hi_hi, hi_lo, lo_hi, lo_lo]
ENCODER_MAP = {
    's16': encode_int16,
    'u16': encode_uint16,
    's32': encode_int32,
    'u32': encode_uint32,
    'u64': encode_uint64,
    's64': encode_int64,
}
def binary_list_to_int_bitwise(bit_list):
    """Converts a list of 0s and 1s (representing a binary number) to an integer using bitwise
operations."""
    result = 0
    for bit in bit_list:

```

```
    result = (result << 1) | bit  
    return result
```

11) Программный код компонента create_file_and_path.py.

```
import csv
import json
import os
from sys import platform
import logging
import configparser
class Util:
    @staticmethod
    def get_data_path(name_file):
        current_script_path = os.path.abspath(__file__)
        if platform == 'win32' or platform == 'win64':
            return os.path.dirname(os.path.dirname(current_script_path)) + f"\\utils\\{name_file}"
        elif platform == 'linux' or platform == 'linux2':
            return os.path.dirname(os.path.dirname(current_script_path)) + f"/utils/{name_file}"
    @staticmethod
    def get_data_path_log(name_file):
        current_script_path = os.path.abspath(__file__)
        if platform == 'win32' or platform == 'win64':
            return os.path.dirname(os.path.dirname(current_script_path)) + f"\\log\\{name_file}"
        elif platform == 'linux' or platform == 'linux2':
            return os.path.dirname(os.path.dirname(current_script_path)) + f"/log/{name_file}"
    def open_json(self, name_file):
        try:
            path = self.get_data_path(name_file)
            with open(path, 'r') as json_file:
                data = json.load(json_file)
            return data
        except Exception as e:
            print(f"Ошибка открытия {name_file}: {e}")
    def create_json(self, name_file, data):
        try:
            path = self.get_data_path(name_file)
```

```

    with open(path, 'w') as json_file:
        json.dump(data, json_file, indent=4)
    except Exception as e:
        print(f"Ошибка создания {name_file}: {e}")
def open_csv(self, name_file, mode, data):
    path = self.get_data_path(name_file)
    with open(path, mode=mode, encoding='utf-8', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file)
        data_to_add = data
        writer.writerow(data_to_add)
def create_log(self, mode):
    path = self.get_data_path_log("py_log_mqtt.log")
    logging.basicConfig(level=logging.INFO, filename=path, filemode=mode,
                        format="%(asctime)s %(levelname)s %(message)s")
def config_pars(self, name):
    config = configparser.ConfigParser()
    project_root_path = self.get_data_path(name)
    config.read(project_root_path)
    return config

```

12) Программный код компонента contact_mqtt.py.

```
import paho.mqtt.client as mqtt # Импортируем библиотеку paho-mqtt для работы с MQTT
from utils.create_file_and_path import Util # Импортируем утилиту для работы с файлами
и путями
# Функция, вызываемая при подключении к MQTT брокеру
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc == 0:
        # если код возврата 0, подключение прошло успешно
        print("Подключение к MQTT прошло успешно")
        print("-----")
        client.subscribe('#') # Подписываемся на все темы
    else:
        # В случае ошибки выводим сообщение
        print("Ошибка при подключении к MQTT")
# Функция для установки соединения с MQTT брокером
def connection():
    # Загружаем конфигурацию из файла 'setting.ini'
    config = Util().config_pars('setting.ini')
    # Получаем параметры подключения из конфигурационного файла
    user = config["MQTT"]["USER"]
    password = config["MQTT"]["PASSWORD"]
    host = config["MQTT"]["MQTT_HOST"]
    port = int(config["MQTT"]["MQTT_PORT"]) # по умолчанию порт 1883 занимает MQTT
брокер
    interval = int(config["MQTT"]["MQTT_KEEPLIVE_INTERVAL"])
    # Создаем MQTT клиента
    mqttc = mqtt.Client()
    # Устанавливаем имя пользователя и пароль для подключения
    mqttc.username_pw_set(username=user, password=password)
    # Назначаем функцию обратного вызова при подключении
    mqttc.on_connect = on_connect
    # Подключаемся к MQTT брокеру с указанными параметрами
    mqttc.connect(host, port, interval)
```

```
# Запускаем цикл обработки сообщений
mqttc.loop_start()
return mqttc # Возвращаем объект MQTT клиента иными словами подключение к
MQTT брокеру
```

13) Программный код компонента publish.py.

```
import json
class Publish:
    def __init__(self, mqttc):
        """
        Инициализация объекта Publish.
        :param mqttc: Объект клиента MQTT для публикации сообщений.
        """
        self.mqttc = mqttc
    def publish_data_emulators(self, emulator):
        """
        Публикация данных эмулятора в MQTT-топики.
        :param emulator: Объект эмулятора, содержащий данные для публикации.
        """
        if emulator.sockets_flag:
            try:
                # Публикуем данные о напряжении, токе и мощности эмулятора
                self.mqttc.publish(
                    f'mpei/Emulator_{emulator.socket.getpeername()}/Volt',
                    payload=json.dumps({"value": emulator.result[0]})
                )
                self.mqttc.publish(
                    f'mpei/Emulator_{emulator.socket.getpeername()}/Current',
                    payload=json.dumps({"value": emulator.result[1]})
                )
                self.mqttc.publish(
                    f'mpei/Emulator_{emulator.socket.getpeername()}/Power',
                    payload=json.dumps({"value": emulator.power})
                )
            except TypeError:
                print(f"Ошибка: выходные параметры {emulator.socket} являются типа None")
        else:
            # если данные отсутствуют, публикуем нулевые значения
```

```

self.mqttc.publish(
    f'mpei/Emulator_{emulator.socket.getpeername()}/Volt',
    payload=json.dumps({"value": 0})
)
self.mqttc.publish(
    f'mpei/Emulator_{emulator.socket.getpeername()}/Current',
    payload=json.dumps({"value": 0})
)
self.mqttc.publish(
    f'mpei/Emulator_{emulator.socket.getpeername()}/Power',
    payload=json.dumps({"value": 0})
)
def push_name_socket(self, em, name):
    """
    Публикация имени сокета эмулятора в MQTT-топик.
    Необходимо вынести в базу данных.
    :param em: Объект эмулятора.
    :param name: Имя для публикации.
    """
    msg = em.socket.getpeername()
    self.mqttc.publish(f'mpei/info/{name}', f'{msg}')

```

14) Программный код компонента load_connect.py.

```
import os
import json
from pymodbus.client import AsyncModbusTcpClient
from Reactive_Load.utils import DECODER_MAP
# Класс клиента блока активной нагрузки: отвечает за подключение
class ActiveLoad:
    # функция init: принимает адрес модуля имитации нагрузки, порт, Modbus unit ID и
    # путь к файлу конфигурации
    def __init__(self, ip, port=502, unit_id=1, config_path=None):
        # IP-адрес устройства
        self.ip = ip
        # Порт Modbus TCP (обычно 502)
        self.port = port
        # Номер устройства (slave id / unit id) на шине Modbus
        self.unit_id = unit_id
        # если путь к файлу конфигурации не передан — формируем путь к
        data_topics_Active_Load.json рядом с этим файлом
        if config_path is None:
            # os.path.dirname(__file__) — папка, где лежит текущий .py; к ней добавляем имя
            JSON
            self.config_path = os.path.join(os.path.dirname(__file__),
            "data_topics_Active_Load.json")
        else:
            # Иначе используем путь, который передал вызывающий код
            self.config_path = config_path
        # Создаем асинхронный Modbus TCP-клиент
        self.client = AsyncModbusTcpClient(self.ip, port=self.port)
        # Создаем пустой список для хранения регистров данных из
        data_topics_Active_Load.json
        self.registers = []
        # Асинхронное подключение: открыть TCP и загрузить конфигурацию регистров из
        JSON
```

```

async def connect(self):
    # Открываем соединение Modbus TCP (создание сокета и рукопожатие внутри
клиента)

    await self.client.connect()

    # Читаем файл описания регистров (адреса, длины, декодеры, единицы измерения и
m.n.)

    with open(self.config_path, 'r') as file:
        self.registers = json.load(file)

    # Главный метод чтения: обойти все регистры, указанные в файле конфигурации
async def read_registers(self):
    result = {}

    for parameter in self.registers:
        name = parameter["name"]
        decoder_key = parameter["decoder"]
        response = await self.client.read_holding_registers(address=parameter['address'],
count=parameter['count'], slave=self.unit_id)
        decoder = DECODER_MAP.get(parameter['decoder'])
        if decoder:
            value = decoder(response.registers)
            print(value)
            result[parameter["name"]] = value
        else:
            bits = struct.pack('<HH', response.registers[0], response.registers[1])
            value = struct.unpack('<f', bits)[0]
            result[parameter["name"]] = f"{round(value, 3)}"

    return result

async def write_registers_to_hold_connection(self):
    # Для поддержания связи кода с блоком нагрузки требуется отсылать управляющую
команду связи

    command_code = 9

    await self.client.write_register(4, command_code)
async def write_register(self, address, value, device_id):

```

```

# команда для отправки нужных значений на блок нагрузки
await self.client.write_register(address, value, device_id)
async def write_registers(self, address, values, device_id):
    # команда для отправки нужных значений на блок нагрузки
    await self.client.write_registers(address, values, device_id)
# Асинхронное отключение: закрыть TCP-клиент
async def disconnect(self):
    # У rpycmodbus закрытие синхронное — просто закрываем соединение
    self.client.close()
# Функция upsert в таблицу БД: если записи с id уже нет — вставить, если есть —
обновить
def upsert_active_load_telemetry(conn, data: dict, row_id=1):
    """
    Обновляет или вставляет одну строку телеметрии по заданному id (по умолчанию
    id=1).
    Требования:
    • В таблице 'load_active_telemetry' должен быть уникальный ключ/первичный ключ по
    колонке 'id'.
    • 'data' — словарь вида {колонка: значение, ...} с уже подготовленными числовыми
    данными.
    """
    # Список столбцов: сначала 'id', затем имена ключей из словаря data
    columns = ', '.join(['id'] + list(data.keys()))

    # Готовим список "заглушек" для подстановки значений
    # Их столько же, сколько у нас параметров + еще один для id.
    # Это нужно, чтобы безопасно подставлять данные, а не вставлять их прямо в SQL.
    values_template = ', '.join(['%s'] * (len(data) + 1))
    # готовим часть "если запись уже есть, то обновить"
    # Здесь мы говорим: если такая строка с этим id уже есть в таблице,
    # то заменить значения на новые.
    update_clause = ', '.join([f'{{k}}=VALUES({k})' for k in data.keys()])
    # Плюс всегда обновляем метку времени ts на текущую (штамп обновления)

```

```

update_clause += ', ts=CURRENT_TIMESTAMP'
# собираем итоговую команду SQL
# Получается запрос вида:
# "вставить строку с такими данными,
# а если такая строка уже есть — обновить значения".
query = (
    f"INSERT INTO load_active_telemetry ({columns}) VALUES ({values_template}) "
    f"ON DUPLICATE KEY UPDATE {update_clause}"
)
# собираем список значений для подстановки
# Сначала идет id строки,
# потом все значения из словаря data.
values = [row_id] + list(data.values())
# выполняем запрос в базе
# Открываем соединение с базой, отправляем запрос и сохраняем изменения.
with conn.cursor() as cur:
    cur.execute(query, values)
    conn.commit()
# Класс клиента блока реактивной нагрузки: отвечает за подключение
class ReactiveLoad:
    # функция init: принимает адрес модуля имитации нагрузки, порт, Modbus unit ID и
    # путь к файлу конфигурации
    def __init__(self, ip, port=502, unit_id=1, config_path=None):
        # IP-адрес устройства
        self.ip = ip
        # Порт Modbus TCP (обычно 502)
        self.port = port
        # Номер устройства (slave id / unit id) на шине Modbus
        self.unit_id = unit_id
        # если путь к файлу конфигурации не передан — формируем путь к
        data_topics_Reactive_Load.json рядом с этим файлом
        if config_path is None:
            # os.path.dirname(__file__) — папка, где лежит текущий .py; к ней добавляем имя

```

JSON

```
self.config_path = os.path.join(os.path.dirname(__file__),
"data_topics_Reactive_Load.json")
else:
    # Иначе используем путь, который передал вызывающий код
    self.config_path = config_path
    # Создаем асинхронный Modbus TCP-клиент
    self.client = AsyncModbusTcpClient(self.ip, port=self.port)
    # Создаем пустой список для хранения регистров данных из
data_topics_Reactive_Load.json
    self.registers = []
    # Асинхронное подключение: открыть TCP и загрузить конфигурацию регистров из
JSON
    async def connect(self):
        # Открываем соединение Modbus TCP (создание сокета и рукопожатие внутри
клиента)
        await self.client.connect()
        # Читаем файл описания регистров (адреса, длины, декодеры, единицы измерения и
m.n.)
        with open(self.config_path, 'r') as file:
            self.registers = json.load(file)
        # Главный метод чтения: обойти все регистры, указанные в файле конфигурации
    async def read_registers(self):
        result = {}
        for parameter in self.registers:
            response = await self.client.read_holding_registers(address=parameter['address'],
count=parameter['count'], slave=self.unit_id)
            decoder = DECODER_MAP.get(parameter['decoder'])
            value = decoder(response.registers)
            print(value)
            result[parameter["name"]] = f"{value}"
        return result
    async def write_registers_to_hold_connection(self):
```

Для поддержания связи кода с блоком нагрузки требуется отсылать управляющую команду связи

```
command_code = 9
```

```
await self.client.write_register(4, command_code)
```

```
async def write_register(self, address, value, device_id):
```

команда для отправки нужных значений на блок нагрузки

```
await self.client.write_register(address, value, device_id)
```

```
async def write_registers(self, address, values, device_id):
```

команда для отправки нужных значений на блок нагрузки

```
await self.client.write_registers(address, values, device_id)
```

Асинхронное отключение: закрыть TCP-клиент

```
async def disconnect(self):
```

У rpycmodbus закрытие синхронное — просто закрываем соединение

```
self.client.close()
```

Функция upsert в таблицу БД: если записи с id уже нет — вставить, если есть — обновить

```
def upsert_reactive_load_telemetry(conn, data: dict, row_id=1):
```

```
    """
```

Обновляет или вставляет одну строку телеметрии по заданному id (по умолчанию id=1).

Требования:

- В таблице 'load_reactive_telemetry' должен быть уникальный ключ/первичный ключ по колонке 'id'.*

- 'data' — словарь вида {колонка: значение, ...} с уже подготовленными числовыми данными.*

```
    """
```

Список столбцов: сначала 'id', затем имена ключей из словаря data

```
columns = ', '.join(['id'] + list(data.keys()))
```

готовим список "заглушек" для подстановки значений

Их столько же, сколько у нас параметров + еще один для id.

Это нужно, чтобы безопасно подставлять данные, а не вставлять их прямо в SQL.

```
values_template = ', '.join(['%s'] * (len(data) + 1))
```

готовим часть "если запись уже есть, то обновить"

```

# Здесь мы говорим: если такая строка с этим id уже есть в таблице,
# то заменить значения на новые.
update_clause = ', '.join([f"{k}=VALUES({k})" for k in data.keys()])
# Плюс всегда обновляем метку времени ts на текущую (штамп обновления)
update_clause += ', ts=CURRENT_TIMESTAMP'
# собираем итоговую команду SQL
# Получается запрос вида:
# "вставить строку с такими данными,
# а если такая строка уже есть — обновить значения".
query = (
    f"INSERT INTO load_reactive_telemetry ({columns}) VALUES ({values_template}) "
    f"ON DUPLICATE KEY UPDATE {update_clause}"
)
# собираем список значений для подстановки
# Сначала идет id строки,
# потом все значения из словаря data.
values = [row_id] + list(data.values())

# выполняем запрос в базе
# Открываем соединение с базой, отправляем запрос и сохраняем изменения.
with conn.cursor() as cur:
    cur.execute(query, values)
conn.commit()

```

15) Программный код компонента `emulators_connect.py`.

```
import configparser # Импортируем модуль для работы с конфигурационными файлами
import socket # Импортируем модуль для работы с сетевыми сокетами
import re # Импортируем модуль для работы с регулярными выражениями
class ContactEmulators:
    def __init__(self, name_config):
        # Инициализация переменных класса
        self.result = None # Переменная для хранения результатов измерений
        self.power = None # Переменная для хранения рассчитанной мощности
        self.socket = None # Переменная для хранения объекта сокета
        self.config = configparser.ConfigParser() # Создаем объект для работы с
        конфигурационными файлами
        self.sockets = [] # Список для хранения сокетов
        self.command_list = ["MEAS:VOL?", "MEAS:CUR?", "MEAS:POW?"] # Список
        команд для эмулятора
        self.name_config = name_config # Имя конфигурационного файла или секции
    def socket_works(self):
        """
        Проверяет, жив ли сокет эмулятора.
        Возвращает True, если соединение активно, иначе False.
        """
        if self.socket is None:
            return False
        try:
            # Проверяем доступность сокета — пустая отправка не вызывает сетевой
            активности,
            # но позволяет отловить "мертвый" сокет.
            self.socket.send(b"")
            return True
        except Exception:
            return False
    def close_socket(self):
        try:
```

```

# Попытка корректно закрыть сокетное соединение
print("closed socket ", self.socket)
self.socket.shutdown(socket.SHUT_RDWR) # Завершаем передачу и прием данных
self.socket.close() # Закрываем сокет
except Exception as e:
    # Обработка исключений при закрытии сокета
    print("Сокет закрыт", self.socket, e)
def __connect_sockets(self, data_socket, timeout_seconds):
    print(f"Подключение к имитатору: {data_socket}")
    ip, port = data_socket # Получаем IP и порт из переданных данных
    try:
        # Создаем TCP/IP сокет
        supply_socket = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
        # Разрешаем повторное использование адреса сокета
        supply_socket.setsockopt(socket.SOL_SOCKET, socket.SO_REUSEADDR, 1)
        # Подключаемся к эмулятору
        supply_socket.connect((ip, port))
        # Устанавливаем флаг успешного подключения
        print(f"Успешное подключение к {data_socket}")
        print(f"-----")
        self.sockets_flag = True
        return supply_socket # Возвращаем сокет для дальнейшего использования
    except (ConnectionRefusedError, TimeoutError) as e:
        # Обработка исключений при неудачном подключении
        print(f"Ошибка {e} при подключении к {data_socket}")
        print(f"-----")
        self.sockets_flag = False
def send_and_receive_command(self, msg, supply_socket):
    try:
        # Отправляем команду эмулятору
        msg = msg + "\n"
        supply_socket.sendall(msg.encode("UTF-8"))
        # Получаем размер буфера для получения данных из конфигурации

```

```

buffer_size = self.config[self.name_config]["BUFFER_SIZE"]
try:
    """Принимаем и декодируем ответ, извлекая числовые значения с помощью
регулярных выражений
шаблон r'\d+\.\d+' ищет подстроки, которые представляют собой числа с
десятичной точкой
\d+ означает "одна или более цифр".
\. соответствует символу точки.
\d+ после точки снова означает "одна или более цифр"."""
    return re.findall(r'\d+\.\d+', supply_socket.recv(int(buffer_size)).decode())
except TimeoutError as e:
    # Обработка исключения при таймауте получения данных
    print(e)
except Exception as e:
    # Обработка исключений при отправке или получении данных
    print("send_and_receive_command", e)
def connection_sim(self, path):
    # Чтение конфигурационного файла для получения настроек подключения
    self.config.read(path)
    ip = self.config[self.name_config]["IP"] # Получаем IP адрес из конфигурации
    port = int(self.config[self.name_config]["PORT"]) # Получаем порт из конфигурации по
умолчанию 8462 в эмуляторе
    timeout = int(self.config[self.name_config]["TIMEOUT_SECONDS"]) # Получаем
таймаут из конфигурации
    # Устанавливаем соединение с эмулятором через сокет
    self.socket = self.__connect_sockets([ip, port], timeout)
def get_data_emulators(self):
    # Получаем данные от эмулятора, если сокет успешно подключен
    if self.sockets_flag:
        try:
            # Отправляем команды на измерение напряжения и тока
            self.result = self.send_and_receive_command("MEAS:VOL?\nMEAS:CUR?",
self.socket)

```

```

# Проверяем, что self.result есть и там как минимум два значения
if not self.result or len(self.result) < 2:
    print(f"[ERROR] Нет валидных данных от эмулятора {self.socket}."
result={self.result}")
    self.power = None
    return

# Рассчитываем мощность на основе полученных данных
self.power = f"{float(self.result[0]) * float(self.result[1])}"
except Exception as ex:
    # Логируем любые ошибки, чтобы не упал весь процесс
    print(f"[ERROR] Ошибка при получении данных от эмулятора {self.socket}:
{ex}")
    self.power = None

```

16) Программный код компонента emulators_command.py.

class CommandEmulators:

def __init__(self, socket):

Инициализация объекта класса CommandEmulators

socket - сокетное соединение, через которое будут отправляться команды эмулятору

self.socket = socket

Список допустимых источников сигналов, которые могут быть установлены

self.validSrcList = ["front", "web", "seq", "eth", "slot1", "slot2", "slot3", "slot4", "loc",
"rem"]

def send_command(self, msg):

Метод для отправки команды через сокетное соединение

msg - строка с командой для отправки

try:

print(f"Calling command: {msg}")

Добавление символа новой строки в конец команды

msg = msg + "\n"

Отправка команды через сокетное соединение

self.socket.sendall(msg.encode("UTF-8"))

except Exception as e:

Обработка возможных исключений при отправке команды

print(e)

def set_prog_source_v(self, src):

Метод для установки источника напряжения (Voltage) для программного управления

src - строка, указывающая на источник (должен быть в списке validSrcList)

retval = 0

if src **in** self.validSrcList:

если источник валиден, отправляем команду на установку источника напряжения

self.send_command("SYST:REM:CV {0}".format(src))

else:

если источник не валиден, возвращаем -1 как ошибку

retval = -1

return retval

def set_prog_source_i(self, src):

```
# Метод для установки источника тока (Current) для программного управления
# src - строка, указывающая на источник (должен быть в списке validSrcList)
retval = 0
if src.lower() in self.validSrcList:
    # если источник валиден, отправляем команду на установку источника тока
    self.send_command("SYST:REM:CC {}".format(src))
else:
    # если источник не валиден, возвращаем -1 как ошибку
    retval = -1
return retval
```

17) Программный код компонента emulators_callback.py.

```
import json

class EmCallback:

    def __init__(self, mqttc, em, em_command):
        # Инициализация объекта класса EmCallback
        # mqttc - объект MQTT-клиента
        # em - объект, представляющий эмулятор
        # em_command - объект для отправки команд эмулятору
        self.flag_get_data = None
        self.em = em
        self.mqttc = mqttc
        self.em_command = em_command
        self.flag = True
        # Словарь для хранения предыдущих команд, отправленных эмулятору
        self.old_command = {
            "OUTPUT, ": 0,
            "SYST:INT:SIM:SET TPV,": None,
            "SYST:INT:SIM:SET GPV,": None
        }

    def callback_data(self, topic="mpei/command_operator/em"):
        # Метод для подписки на определенную тему MQTT и назначения callback-функции
        # topic - тема, на которую происходит подписка
        self.mqttc.message_callback_add(topic, self.get_data)

    def get_data(self, client, userdata, data):
        # Метод для обработки входящих сообщений от MQTT
        # client - MQTT-клиент
        # userdata - пользовательские данные (не используются здесь)
        # data - сообщение MQTT
        parsed_data = json.loads(data.payload.decode("utf-8", "ignore"))
        # Валидация полученных данных
        self.validate_data(data)
        # если данные прошли валидацию, отправляем команду эмулятору
        if self.flag_get_data:
```

```

        self.push_command(parsed_data)
def validate_data(self, data):
    # Метод для валидации полученных данных
    # Устанавливаем флаг успешной валидации, если данные не пустые
    if data:
        self.flag_get_data = True
def command_out(self, msg):
    # Метод для отправки команд эмулятору
    # msg - словарь с командами для отправки
    for key, value in msg.items():
        command = f"{key}{value}"
        self.em_command.send_command(command)
def push_command(self, msg):
    # Метод для отправки набора команд эмулятору
    # msg - словарь с командами для отправки
    self.em_command.set_prog_source_v("eth")
    self.em_command.set_prog_source_i("eth")
    for key, value in msg.items():
        command = f"{key}{value}"
        self.em_command.send_command(command)
    self.em_command.set_prog_source_v("slot4")
    self.em_command.set_prog_source_i("slot4")
def command_processing_em(self, start_stop_em, command, value):
    # Метод для обработки команд start/stop и их отправки эмулятору
    # start_stop_em - флаг для запуска/остановки эмулятора
    # command - команда для эмулятора
    # value - значение команды
    if start_stop_em:
        # если эмулятор должен быть запущен и команда изменилась с последнего раза
        if self.old_command[command] != value:
            self.command_out({
                command: value,
            })

```

```

# Обновляем сохраненную команду
self.old_command[command] = value
# Включаем выход
self.command_out({
    "OUTPUT, ": 1,
})
self.old_command["OUTPUT, "] = 1
print(f"Команда {command}{value} на {self.em.socket.getpeername()}")
else:
# если эмулятор должен быть остановлен и команда изменилась с последнего раза
if self.old_command[command] != value:
    self.command_out({
        command: value,
    })
# Отключаем выход
self.command_out({
    "OUTPUT, ": 0,
})
self.old_command[command] = value
print(f"Команда {command}{value} на {self.em.socket.getpeername()}")

```

18) Программный код компонента `command_operator.py`.

class Command:

def __init__(self, mqttc, connect):

"""

Инициализация объекта Command.

:param mqttc: Объект клиента MQTT для работы с брокером.

:param connect: Объект подключения к базе данных.

"""

`self.parsed_data = None`

`self.mqttc = mqttc`

`self.connect = connect`

def callback_data(self, topic='mpei/command/on_off'):

"""

Настройка колбэка для обработки сообщений MQTT на указанном топике.

:param topic: Топик для подписки.

"""

`self.mqttc.message_callback_add(topic, self.get_data)`

def get_data(self, client, userdata, data):

"""

Обработка входящих данных MQTT.

:param client: Клиент MQTT.

:param userdata: Пользовательские данные.

:param data: Сообщение MQTT.

"""

try:

`self.parsed_data = int(data.payload.decode())`

if self.parsed_data:

`print("Команда включена.", self.parsed_data)`

else:

`print('Команда выключена', self.parsed_data)`

except Exception as e:

`print(f"Ошибка при обработке данных: {e}")`

def validate_data(self, data):

```

"""
Проверка данных. На данный момент метод не используется.
:param data: Данные для проверки.
"""

pass

def check_connections(self, column):
    """
    Проверка значения в колонке таблицы управления сигналами.
    :param column: Название колонки для проверки.
    :return: Значение в указанной колонке.
    """

    cursor = self.connect.cursor()
    cursor.execute("SELECT * FROM control_scripts_signal")
    start_stop = cursor.fetchone()[column]
    cursor.close()
    cursor.close()
    return start_stop

def get_param_em(self, tables):
    """
    Получение параметров из указанной таблицы.
    :param tables: Название таблицы.
    :return: Список параметров.
    """

    cursor = self.connect.cursor()
    cursor.execute(f"SELECT * FROM {tables}")
    param_em = list(cursor.fetchall()[0].values())
    cursor.close()
    return param_em

def get_available_dgu(self):
    """
    Получение списка исключенных дизельных генераторов.
    :return: Список исключенных генераторов.
    """

```

```

cursor = self.connect.cursor()
cursor.execute("SELECT * FROM avaiability")
excluded_engines = list(cursor.fetchall()[0].values())[0:2]
return excluded_engines
def update_param_dgu(self, data, dgu):
    """
    Обновление данных о текущей мощности и токе для указанного дизельного
генератора.
:param data: Данные о мощности и токе.
:param dgu: Идентификатор дизельного генератора.
    """
    cursor = self.connect.cursor()
    query = ("""UPDATE diesel
        SET
        power_L1 = %s,
        power_L2 = %s,
        power_L3 = %s,
        current_L1 = %s,
        current_L2 = %s,
        current_L3 = %s,
        voltage_L1 = %s,
        voltage_L2 = %s,
        voltage_L3 = %s,
        frequency_L1 = %s,
        frequency_L2 = %s,
        frequency_L3 = %s,
        rpm = %s
        WHERE slave = {dgu}""")
    cursor.execute(query, list(data))
    cursor.close()
def get_excluded_engines(self):
    """
    Получение списка исключенных дизельных генераторов.

```

```

:return: Список исключенных генераторов.
"""

cursor = self.connect.cursor()
cursor.execute("SELECT * FROM Управление_ДГУ_new")
excluded_engines = cursor.fetchall()
cursor.close()
return excluded_engines

def update_excluded_engines(self, available_dgu, status):
    """
    Обновление статуса для исключенных дизельных генераторов.
    :param available_dgu: Список доступных генераторов.
    :param status: Новый статус.
    """
    cursor = self.connect.cursor()
    for dgu in available_dgu:
        cursor.execute(f"UPDATE Управление_ДГУ_new SET control_dgu = {status} WHERE
slave = {dgu['slave']}")
    cursor.close()

def update_control_signal(self, column, status):
    """
    Обновление сигнала управления в таблице control_signal.
    :param column: Название колонки для обновления.
    :param status: Новый статус.
    """
    cursor = self.connect.cursor()
    cursor.execute(f"UPDATE Сигнал_управления SET {column} = {status} WHERE id = 1")
    cursor.close()

def update_param_em(self, params, c):
    """
    Обновление параметров в таблице solar_station.
    :param params: Список значений для обновления.
    :param c: Список названий колонок.
    """

```

```

cursor = self.connect.cursor()
query = (f" UPDATE PV_DC_telemetry "
        f" SET "
        f"{c[0]} = %s, "
        f"{c[1]} = %s, "
        f"{c[2]} = %s")
cursor.execute(query, params)
cursor.close()
def update_param_victron(self, columns, params):
    """
    Обновление параметров в таблице energy_storage_system.
    :param c: Список названий колонок.
    :param params: Список значений для обновления.
    """
    # print(columns, len(columns))
    # print(params, len(params))
    cursor = self.connect.cursor()
    print('update')
    query = (""" UPDATE victron_telemetry SET
        voltage_L1_consumption = %s,
        voltage_L2_consumption = %s,
        voltage_L3_consumption = %s,
        power_L1_consumption = %s,
        power_L2_consumption = %s,
        power_L3_consumption = %s,
        current_L1_consumption = %s,
        current_L2_consumption = %s,
        current_L3_consumption = %s,
        frequency_L1_consumption = %s,
        frequency_L2_consumption = %s,
        frequency_L3_consumption = %s,
        current_ESS = %s,
        power_ESS = %s,
    """

```

```

        voltage_ESS = %s,
        SOC_ESS = %s,
        power_L1_grid = %s,
        power_L2_grid = %s,
        power_L3_grid = %s,
        voltage_L1_grid = %s,
        voltage_L2_grid = %s,
        voltage_L3_grid = %s,
        current_L1_grid = %s,
        current_L2_grid = %s,
        current_L3_grid = %s,
        frequency_L1_grid = %s,
        frequency_L2_grid = %s,
        frequency_L3_grid = %s """
    cursor.execute(query, params)
    cursor.close()

def get_setting(self):
    """
    Получение настроек из таблицы settings.
    :return: Настройки.
    """
    cursor = self.connect.cursor()
    cursor.execute("SELECT * FROM Настройки")
    setting = cursor.fetchall()[0]
    cursor.close()
    return setting

def update_current_weather(self, params):
    cursor = self.connect.cursor()
    query = """
    UPDATE weather_current SET irradiation = %s, temperature = %s
    """
    cursor.execute(query, params)
    cursor.close()

```

19) Программный код компонента victron_contact.py.

```
import json
import datetime
from functools import partial
class VictronCommand:
    def __init__(self, mqttc):
        """
        Инициализация объекта VictronCommand.
        :param mqttc: Объект клиента MQTT для публикации и получения сообщений.
        """
        self.parsed_data = None # Хранение распарсенных данных
        self.flag_parsed_data = False # Флаг, указывающий на то, что данные распарсены
        self.dictionary = None # Словарь для хранения данных
        self.flag_get_data = False # Флаг, указывающий на то, что данные получены
        self.dict_msg = {
            "voltage_L1_consumption": 0,
            "voltage_L3_consumption": 0,
            "voltage_L2_consumption": 0,
            "power_L1_consumption": 0,
            "power_L2_consumption": 0,
            "power_L3_consumption": 0,
            "current_L1_consumption": 0,
            "current_L2_consumption": 0,
            "current_L3_consumption": 0,
            "frequency_L1_consumption": 0,
            "frequency_L2_consumption": 0,
            "frequency_L3_consumption": 0,
            "current_ESS": 0,
            "power_ESS": 0,
            "voltage_ESS": 0,
            "SOC_ESS": 0,
            "power_L1_grid": 0,
            "power_L2_grid": 0,
```

```

    "power_L3_grid": 0,
    "voltage_L1_grid": 0,
    "voltage_L2_grid": 0,
    "voltage_L3_grid": 0,
    "current_L1_grid": 0,
    "current_L2_grid": 0,
    "current_L3_grid": 0,
    "frequency_L1_grid": 0,
    "frequency_L2_grid": 0,
    "frequency_L3_grid": 0,
}

# Словарь для хранения различных данных, полученных от устройства
self.mqttc = mqttc # Сохранение объекта клиента MQTT

def survey_victron(self):
    """
    Отправка сообщения для проверки связи с Victron.
    """
    # Публикация сообщения для проверки связи
    self.mqttc.publish('R/d436391ea13a/keepalive/', 'empty')

def get_data(self, client, userdata, data, key):
    """
    Обработка данных, полученных от MQTT, для конкретного ключа.
    :param client: Клиент MQTT.
    :param userdata: Данные пользователя.
    :param data: Полученные данные.
    :param key: Ключ для обновления значения в dict_msg.
    """
    try:
        # Декодирование и распарсивание данных из JSON
        parsed_data = json.loads(data.payload.decode("utf-8", "ignore"))
        self.dictionary = parsed_data # Сохранение распарсированных данных в словарь
        # Обновление значения в словаре с данными
        self.dict_msg[key] = self.dictionary.get('value', 0)
    
```

```

self.validate_data(data) # Проверка данных на корректность
if self.flag_get_data:
    self.parsed_data = parsed_data # Сохранение распарсированных данных
    self.flag_parsed_data = True # Установка флага, что данные распарсены
else:
    print("Получена пустая полезная нагрузка:", data.topic) # Вывод сообщения в
случае пустых данных

except json.JSONDecodeError as e:
    # Обработка ошибки декодирования JSON
    print("Ошибка декодирования JSON:", e)
def callback_data_all(self, log_victron, topic="N/d436391ea13a/#"):
    """
    Настройка callback-функции для обработки данных по всем топикам.
    :param log_victron: Функция для записи данных в лог.
    :param topic: Топик для подписки.
    """
    self.log_victron = log_victron # Сохранение функции для логирования
    # Добавление функции обратного вызова для обработки данных по указанному
топику
    self.mqttc.message_callback_add(topic, self.get_data_all)
def get_data_all(self, client, userdata, data):
    """
    Обработка данных, полученных по топику, и запись в лог.
    :param client: Клиент MQTT.
    :param userdata: Данные пользователя.
    :param data: Полученные данные.
    """
    try:
        # Декодирование и распарсивание данных из JSON
        parsed_data = json.loads(data.payload.decode("utf-8", "ignore"))
        self.validate_data(data) # Проверка данных на корректность
        if self.flag_get_data:
            # Запись данных в лог

```

```

        self.log_victron('log_victron.csv', 'a', [data.topic, parsed_data, f"time
{datetime.datetime.now()}"])
    else:
        print("Получена пустая полезная нагрузка:", data.topic) # Вывод сообщения в
случае пустых данных
    except json.JSONDecodeError as e:
        # Обработка ошибки декодирования JSON
        print("Ошибка декодирования JSON:", e, data.topic)
def callback_data(self, topic):
    """
    Настройка callback-функции для обработки данных по указанным топикам.
    :param topic: Словарь с топиками и соответствующими ключами.
    """
    # Для каждого ключа и топики добавляем обработчик данных
    for key, item in topic.items():
        self.mqttc.message_callback_add(item, partial(self.get_data, key=key))
def publish_topic(self, topics_client):
    """
    Публикация данных по указанным топикам.
    :param topics_client: Словарь с топиками и значениями для публикации.
    """
    # Для каждого ключа и значения публикуем данные по соответствующему топику
    for key, item in self.dict_msg.items():
        self.mqttc.publish(
            topics_client.get(key), item
        )
def validate_data(self, data):
    """
    Проверка данных на корректность.
    :param data: Данные для проверки.
    :return: True если данные корректны, иначе False.
    """
    if data:

```

```
self.flag_get_data = True # Установка флага, что данные получены  
return True  
return False
```

20) Программный код компонента Sma_connect.py.

```
import os
import json
# Асинхронный Modbus TCP-клиент из pymodbus
from pymodbus.client import AsyncModbusTcpClient
# Импорт таблицы декодеров и функции масштабирования FIX из utils
from utils.Sma_modbus_utils import DECODER_MAP, decode_fix
# Класс клиента SMA: отвечает за подключение, чтение регистров и их преобразование
class SMAClient:
    # инит: принимает адрес инвертора, порт, Modbus unit ID и путь к конфигу с описанием
    # регистров
    def __init__(self, ip, port=502, unit_id=3, config_path=None):
        # IP-адрес инвертора
        self.ip = ip
        # Порт Modbus TCP (обычно 502)
        self.port = port
        # Номер устройства (slave id / unit id) на шине Modbus
        self.unit_id = unit_id
        # если путь к конфигу не передали — формируем путь к Sma_ports.json рядом с этим
        # файлом
        if config_path is None:
            # os.path.dirname(__file__) — папка, где лежит текущий .py; к ней добавляем имя
            # JSON
            self.config_path = os.path.join(os.path.dirname(__file__), "Sma_ports.json")
        else:
            # Иначе используем путь, который передал вызывающий код
            self.config_path = config_path
        # Создаем асинхронный Modbus TCP-клиент, но еще не подключаемся
        self.client = AsyncModbusTcpClient(self.ip, port=self.port)
        # Здесь позже будет лежать список регистров (из JSON)
        self.registers = []
        # Вспомогательный метод: сгруппировать регистры в «блоки» для пакетного чтения
        # registers — список словарей с полями: name, address, count, decoder, unit, fix...
```

```

# max_gap — максимально допустимый разрыв между соседними регистрами внутри
блока

# max_block_size — максимально допустимая ширина читаемого диапазона (в
регистрах)

def group_registers(self, registers, max_gap=6, max_block_size=100):
    # Список готовых блоков
    blocks = []

    # Текущий накапливаемый блок
    current_block = []

    # Идем по регистраам, отсортированным по адресу по возрастанию
    for reg in sorted(registers, key=lambda x: x['address']):
        # если текущий блок пуст — стартуем новый
        if not current_block:
            current_block = [reg]
        else:
            # Берем последний регистр текущего блока
            prev = current_block[-1]

            # проверяем, можно ли текущий регистр "приклеить" к уже набираемому блоку
            # Почему это важно:
            # Modbus читает диапазоны адресов пачкой. Чтобы не делать много маленьких
запросов,
            # мы пытаемся объединять близкие по адресу регистры в один блок чтения.
            # Считаем "конец" предыдущего регистра в текущем блоке:
            prev_end = prev['address'] + prev['count']

            # Проверяем два условия:
            # Условие №1 (плотность): разрыв между предыдущим концом и началом нового
регистра
            # не больше max_gap (ммакс_шага). Т.е. регистр действительно находится
"рядом", без больших дыр.
            # Условие №2 (не раздувать блок): суммарная ширина блока от ПерВОГО адреса
            # до КОНЦА нового регистра не превышает
max_block_size(макс_размера_блока). Иначе блок станет слишком широким.
            if (reg['address'] - prev_end) <= max_gap and \

```

```

        (reg['address'] + reg['count'] - current_block[0]['address']) <= max_block_size:
# если условия выполняются — просто добавляем регистр в текущий блок
current_block.append(reg)
else:
# Иначе — закрываем текущий блок и начинаем новый с текущего регистра
blocks.append(current_block)
current_block = [reg]

# После цикла не забываем положить последний незакрытый блок
if current_block:
    blocks.append(current_block)

# Возвращаем список блоков для пакетного чтения
return blocks

# Асинхронное подключение: открыть TCP и загрузить конфигурацию регистров из
JSON
async def connect(self):
    # Открываем соединение Modbus TCP (создание сокета и рукопожатие внутри
клиента)
    await self.client.connect()

    # Читаем файл описания регистров (адреса, длины, декодеры, единицы измерения и
т.п.)
    with open(self.config_path, encoding='utf-8') as f:
        self.registers = json.load(f)

    # Асинхронное отключение: закрыть TCP-клиент
async def disconnect(self):
    # У pymodbus закрытие синхронное — просто закрываем соединение
    self.client.close()

    # Главный метод чтения: обойти все регистры, сгруппировать их, прочитать блоками и
преобразовать значения
async def read_all_registers(self):
    # Шаг 1. Сгруппировать регистры для минимального числа Modbus-запросов
    blocks = self.group_registers(self.registers)

    # Сюда будем складывать «имя параметра → строка "значение единица"» или текст
ошибки

```

```

result = {}

# Шаг 2. Идем по каждому блоку
for block in blocks:
    # Нижняя граница блока — минимальный адрес среди регистров блока
    min_addr = min(reg['address'] for reg in block)
    # Верхняя граница блока — максимум (адрес + длина) среди регистров блока
    max_addr = max(reg['address'] + reg['count'] for reg in block)
    # Общее количество 16-битных слов на чтение
    count = max_addr - min_addr

    # ---- выполняем одно пакетное чтение holding-регистров ----
    # Важно: slave=self.unit_id — это номер устройства (Unit ID) в сети Modbus
    response = await self.client.read_holding_registers(address=min_addr, count=count,
slave=self.unit_id)

    # если драйвер вернул ошибку — помечаем все параметры блока сообщением и
переходим к следующему блоку
    if response.isError():
        for reg in block:
            result[reg['name']] = f"Error in block: {response}"
            continue

    # если ошибок нет — берем массив всех считанных 16-битных слов
    all_regs = response.registers

    # Шаг 3. Для каждого параметра внутри блока вырезаем его часть из общего ответа
и декодируем
    for reg in block:
        # Смещение этого параметра относительно начала блока
        offset = reg['address'] - min_addr

        # Берем ровно count слов, которые относятся к этому параметру
        regs = all_regs[offset:offset + reg['count']]

        # Находим функцию декодирования по коду (s16/u16/s32/u32/u64)
        decoder = DECODER_MAP.get(reg['decoder'])

        try:
            # Применяем декодер к «сырым» словам → получаем число нужного типа
            value = decoder(regs)

```

```

# При необходимости масштабируем по FIXn (деление на 10^n)
value = decode_fix(value, reg.get('fix', 0))

# Склеиваем итоговую строку «значение + единица измерения» (единица
может быть пустой)
result[reg['name']] = f"{value} {reg.get('unit', '')}"

except Exception as ex:
    # если при декодировании/масштабировании что-то пошло не так — сохраняем
    текст исключения
    result[reg['name']] = f"Exception: {ex}"

# Возвращаем словарь: имя параметра → либо «число с единицей», либо текст
ошибки
return result

# Функция upsert в таблицу БД: если записи с id уже нет — вставить, если есть —
обновить
def upsert_sma_telemetry(conn, data: dict, row_id=1):
    """
    Обновляет или вставляет одну строку телеметрии по заданному id (по умолчанию
    id=1).

    Требования:
    • В таблице 'sma_telemetry' должен быть уникальный ключ/первичный ключ по
    колонке 'id'.
    • 'data' — словарь вида {колонка: значение, ...} с уже подготовленными числовыми
    данными.
    """
    # Список столбцов: сначала 'id', затем имена ключей из словаря data
    columns = ', '.join(['id'] + list(data.keys()))
    # готовим список "заглушек" для подстановки значений
    # Их столько же, сколько у нас параметров + еще один для id.
    # Это нужно, чтобы безопасно подставлять данные, а не вставлять их прямо в SQL.
    values_template = ', '.join(['%s'] * (len(data) + 1))
    # готовим часть "если запись уже есть, то обновить"
    # Здесь мы говорим: если такая строка с этим id уже есть в таблице,
    # то заменить значения на новые.

```

```

update_clause = ', '.join([f"{k}=VALUES({k})" for k in data.keys()])
# Плюс всегда обновляем метку времени ts на текущую (штамп обновления)
update_clause += ', ts=CURRENT_TIMESTAMP'
# собираем итоговую команду SQL
# Получается запрос вида:
# "вставить строку с такими данными,
# а если такая строка уже есть — обновить значения".
query = (
    f"INSERT INTO sma_telemetry ({columns}) VALUES ({values_template}) "
    f"ON DUPLICATE KEY UPDATE {update_clause}" )
# собираем список значений для подстановки
# Сначала идет id строки,
# потом все значения из словаря data.
values = [row_id] + list(data.values())
# выполняем запрос в базе
# Открываем соединение с базой, отправляем запрос и сохраняем изменения.
with conn.cursor() as cur:
    cur.execute(query, values)
conn.commit()

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Протоколы испытаний

1) Протокол проведения испытаний для определения эквивалентных параметров суперконденсатора для верификации математической модели.

ПРОТОКОЛ испытания по пункту № ____

Отчета о научно-исследовательской работе «Разработка теоретических основ построения систем накопления энергии для автоматизированных энергетических комплексов» по теме:
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА ДЛЯ
ВЕРИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

№ 1

2025 г.

1. Объект испытания: Суперконденсатор МСК-96-58 в составе макета солнечно-дизельного комплекса.

2. Цель испытания: верификация математической модели для возможности использования в общей математической модели солнечно-дизельного комплекса.

3. Дата начала испытания: 2025 г.

4. Дата окончания испытания: 2025 г.

5. Место проведения испытания: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), кафедра «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии», лаборатория «Системы управления солнечно-дизельными комплексами»

6. Результаты испытаний

Для записи фиксированных показателей используется два устройства – источник питания ТЕТРОН-30005ЕП с записью данных по Modbus RS485 и осциллограф с фиксированием заранее определенных интервалов. Частота записи источника питания не менее 60 мс с точностью измерений 0,1 В и 0,01 А. Частота записи осциллографа переменна и зависит от длины временного диапазона, но строго записывается в 5958 ячеек. В нашем случае частота записи будет ~4 мс с точностью измерений 0,1 мВ. Обе системы сохраняют данные в формате CSV. Данные, полученные на источнике питания, записываются преимущественно для фиксации тока на длительном промежутке времени. Данные, полученные на осциллографе, записываются преимущественно для фиксации напряжений. Данные устройств согласованы по времени для более точного расчета.

7. Замечания и рекомендации

В связи с ограничениями памяти осциллографа для запоминания данных, используется отдельно написанный скрипт, который выгружает данные через определенный период (24 секунды). Рекомендуется при проведении аналогичного испытания использование специализированного устройства, способное с высокой скоростью и точностью определять данные в цепи. Точка изменения состояния из заряда в

саморазряд между устройствами ТЕТРОН 30005-ЕП и осциллографом составило не более 3 секунд. Время проведения испытания бралось относительно времени осциллографа.

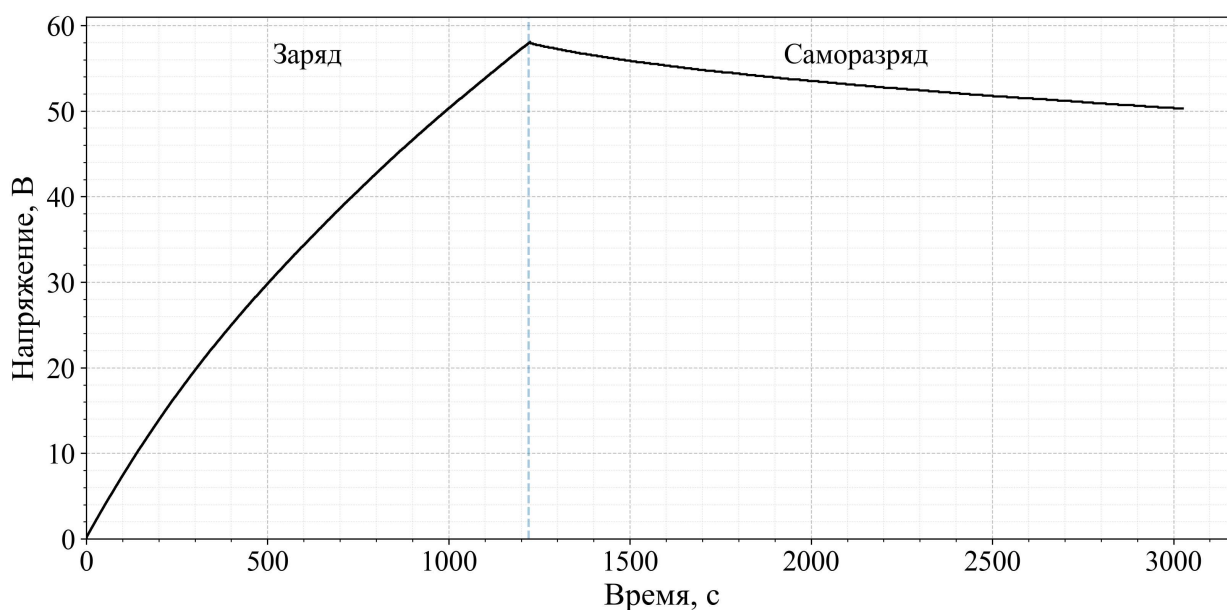


Рисунок 1 – График проведения испытания суперконденсатора Феникс МСК-96-58

Таблица 1 – Результаты проведения испытания при заряде с последующим саморазрядом суперконденсатора

Событие	t , сек	U , В	$[(\Delta U)]$, В	Δt , сек
0	0	0,164	–	–
1	0,120	0,225	0,061	0,120
2	6,498	0,741	0,516	6,378
3	1220,801	58,060	-	-
4	1220,922	58,059	0,002	0,121
5	1273,612	57,559	0,500	52,690
6	1573,614	55,638	1,920	300,002
7	1671,355	55,138	0,500	97,740
8	3020,8	50,424	-	-

8. Выводы

Объект испытания «суперконденсатор Феникс МСК-96-58» прошел испытания по методологии Зубиетты-Бонерта для последующего анализа и расчета испытываемого объекта. При проведении эксперимента суперконденсатор продемонстрировал характерное для него поведение.

Испытание проводили

Инженер-исследователь лаборатории СУ СДК

В.Ю. Харитонов

Инженер-исследователь лаборатории СУ СДК

А.С. Мишин

2) Протокол первичных испытаний макета гибридной системы накопления электрической энергии.

ПРОТОКОЛ
испытания по пункту № ____

Отчета о научно-исследовательской работе «Разработка теоретических основ построения систем накопления энергии для автоматизированных энергетических комплексов» по теме:
**СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ
НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

№ 1

2025 г.

1. Объект испытания: Блок-имитатор НМ-50-T400-K2 в составе макета солнечно-дизельного комплекса.

2. Цель испытания: проверка работоспособности программной и аппаратной части блока-имитатора активной нагрузки.

3. Дата начала испытания: 2025 г.

4. Дата окончания испытания: 2025 г.

5. Место проведения испытания: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), кафедра «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии», лаборатория «Системы управления солнечно-дизельными комплексами».

6. Результаты испытаний

Фиксация значений и передача команд управления производилась при помощи разработанной системы мониторинга и управления (см. пункт 4.3).

Было проведено два экспериментальных исследования для разных дискретностей времени переменности нагрузки:

- для дискретности 100 мс,
- для дискретности 150 мс.

Для удобства представления выходные данные были сохранены в файл в формате CSV. Результаты выполнения экспериментов представлены в таблице 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты проведения испытания при дискретности времени равной 100 мс

Время гггг:мм:дд чч:мм:сс	Коэффициент мощности, о.е.	Мощность, кВт
2025-12-17T16:52:56.294	0.965	0.055
2025-12-17T16:52:56.487	0.966	0.056
2025-12-17T16:52:56.672	0.945	0.052
2025-12-17T16:52:56.855	0.964	0.053
2025-12-17T16:52:57.044	0.965	0.055
2025-12-17T16:52:57.232	0.964	0.054
2025-12-17T16:52:57.417	0.945	0.052
2025-12-17T16:52:57.599	0.965	0.055

Продолжение таблицы 1

Время гггг:мм:дд чч:мм:сс	Коэффициент мощности, о.е.	Мощность, кВт
2025-12-17T16:52:57.784	0.964	0.055
2025-12-17T16:52:57.975	0.944	0.051
2025-12-17T16:52:58.160	0.942	0.049
2025-12-17T16:52:58.343	0.964	0.054
2025-12-17T16:52:58.536	0.964	0.053
2025-12-17T16:52:58.730	0.944	0.051
2025-12-17T16:52:58.916	0.963	0.052
2025-12-17T16:52:59.106	0.963	0.052
2025-12-17T16:52:59.280	0.964	0.053
2025-12-17T16:52:59.469	0.964	0.053
2025-12-17T16:52:59.656	0.945	0.052
2025-12-17T16:52:59.848	0.964	0.054
2025-12-17T16:53:00.039	0.945	0.054
2025-12-17T16:53:00.221	0.981	0.053
2025-12-17T16:53:00.414	0.964	0.053
2025-12-17T16:53:00.615	0.947	0.053
2025-12-17T16:53:00.805	0.964	0.053
2025-12-17T16:53:00.994	0.947	0.053
2025-12-17T16:53:01.185	0.964	0.053
2025-12-17T16:53:01.369	0.945	0.052
2025-12-17T16:53:01.563	0.946	0.053
2025-12-17T16:53:01.748	1	17.443
2025-12-17T16:53:01.935	1	16.434
2025-12-17T16:53:02.129	1	16.256
2025-12-17T16:53:02.321	1	15.634
2025-12-17T16:53:02.503	1	15.585
2025-12-17T16:53:02.690	1	14.424
2025-12-17T16:53:02.889	1	13.503
2025-12-17T16:53:03.079	1	10.778
2025-12-17T16:53:03.269	0.999	7.524
2025-12-17T16:53:03.454	0.996	3.917
2025-12-17T16:53:03.645	0.991	2.616
2025-12-17T16:53:03.842	0.991	2.607
2025-12-17T16:53:04.041	0.991	2.598
2025-12-17T16:53:04.225	0.991	2.597
2025-12-17T16:53:04.418	0.946	1.044
2025-12-17T16:53:04.616	0.947	1.046
2025-12-17T16:53:04.802	0.946	1.042
2025-12-17T16:53:04.998	0.949	1.04
2025-12-17T16:53:05.184	0.95	1.04
2025-12-17T16:53:05.377	0.952	1.037
2025-12-17T16:53:05.563	0.954	1.026
2025-12-17T16:53:05.757	0.958	1.017
2025-12-17T16:53:05.939	0.96	1.007
2025-12-17T16:53:06.148	0.963	0.993

Продолжение таблицы 1

Время гггг:мм:дд чч:мм:сс	Коэффициент мощности, о.е.	Мощность, кВт
2025-12-17T16:53:06.340	0.965	0.968
2025-12-17T16:53:06.530	0.968	0.951
2025-12-17T16:53:06.717	0.972	0.926
2025-12-17T16:53:06.906	0.975	0.895
2025-12-17T16:53:07.097	0.978	0.86
2025-12-17T16:53:07.284	0.983	0.81
2025-12-17T16:53:07.468	0.987	0.759
2025-12-17T16:53:07.654	0.989	0.707
2025-12-17T16:53:07.845	0.991	0.646
2025-12-17T16:53:08.029	0.993	0.596
2025-12-17T16:53:08.217	0.993	0.549
2025-12-17T16:53:08.405	0.992	0.514
2025-12-17T16:53:08.587	0.994	0.489
2025-12-17T16:53:08.767	0.996	0.469
2025-12-17T16:53:08.967	0.991	0.459
2025-12-17T16:53:09.163	0.996	0.451
2025-12-17T16:53:09.350	0.993	0.444
2025-12-17T16:53:09.532	0.993	0.445
2025-12-17T16:53:09.728	0.993	0.438
2025-12-17T16:53:09.926	0.993	0.441
2025-12-17T16:53:10.105	0.993	0.439
2025-12-17T16:53:10.291	0.993	0.439

Таблица 2 – Результаты проведения испытания при дискретности времени равной 150 мс

Время гггг:мм:дд чч:мм:сс	Коэффициент мощности, о.е.	Мощность, кВт
2025-12-17T16:56:50.339	0.947	0.054
2025-12-17T16:56:50.523	0.945	0.052
2025-12-17T16:56:50.711	0.965	0.055
2025-12-17T16:56:50.890	0.945	0.052
2025-12-17T16:56:51.080	0.946	0.053
2025-12-17T16:56:51.258	0.964	0.055
2025-12-17T16:56:51.461	0.964	0.053
2025-12-17T16:56:51.648	0.945	0.052
2025-12-17T16:56:51.847	0.964	0.054
2025-12-17T16:56:52.037	0.945	0.052
2025-12-17T16:56:52.231	0.964	0.054
2025-12-17T16:56:52.413	0.965	0.055
2025-12-17T16:56:52.609	0.964	0.053
2025-12-17T16:56:52.799	1	16.739
2025-12-17T16:56:52.989	1	16.293
2025-12-17T16:56:53.184	1	16.243
2025-12-17T16:56:53.368	1	15.589
2025-12-17T16:56:53.551	1	15.543
2025-12-17T16:56:53.750	1	14.381
2025-12-17T16:56:53.949	1	13.455

Продолжение таблицы 2

Время гггг:мм:дд чч:мм:сс	Коэффициент мощности, о.е.	Мощность, кВт
2025-12-17T16:56:54.144	1	10.738
2025-12-17T16:56:54.337	0.999	7.569
2025-12-17T16:56:54.530	0.998	5.473
2025-12-17T16:56:54.728	0.996	3.906
2025-12-17T16:56:54.923	0.992	2.605
2025-12-17T16:56:55.116	0.991	2.602
2025-12-17T16:56:55.306	0.991	2.596
2025-12-17T16:56:55.503	0.991	2.596
2025-12-17T16:56:55.688	0.949	1.05
2025-12-17T16:56:55.874	0.949	1.049
2025-12-17T16:56:56.059	0.951	1.05
2025-12-17T16:56:56.255	0.954	1.043
2025-12-17T16:56:56.443	0.958	1.038
2025-12-17T16:56:56.632	0.96	1.029
2025-12-17T16:56:56.815	0.962	1.015
2025-12-17T16:56:57.008	0.966	0.994
2025-12-17T16:56:57.191	0.967	0.974
2025-12-17T16:56:57.391	0.97	0.951
2025-12-17T16:56:57.590	0.973	0.914
2025-12-17T16:56:57.773	0.978	0.885
2025-12-17T16:56:57.951	0.98	0.841
2025-12-17T16:56:58.145	0.984	0.788
2025-12-17T16:56:58.327	0.988	0.745
2025-12-17T16:56:58.517	0.99	0.683
2025-12-17T16:56:58.711	0.992	0.629
2025-12-17T16:56:58.898	0.993	0.574
2025-12-17T16:56:59.095	0.994	0.532

7. Замечания и рекомендации

Замечания и рекомендации отсутствуют.

8. Выводы

Результаты испытаний показали готовность программной (подсистем мониторинга батарейного инвертора) и аппаратной (гибридная система накопления энергии) частей к проведению дальнейших экспериментальных исследований и регистрации необходимых для анализа значений. Однако, дискретность переменности нагрузки не может быть меньше 150 мс.

Испытание проводили

Инженер-исследователь лаборатории СУ СДК

В.Ю. Харитонов

Инженер-исследователь лаборатории СУ СДК

И.Ф. Пономарев

ПРОТОКОЛ
испытания по пункту № ____

Отчета о научно-исследовательской работе «Разработка теоретических основ построения систем накопления энергии для автоматизированных энергетических комплексов» по теме:
**СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ
НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

№ 1

2025 г.

1. Объект испытания: система накопления энергии (СНЭ), выполненная свинцово-кислотными аккумуляторными батареями YELLOW GB 12-200 в конфигурации 4s2p в составе макета солнечно-дизельного комплекса.

2. Цель испытания: проверка работоспособности системы мониторинга гибридной СНЭ при длительных испытаниях.

3. Дата начала испытания: 2025 г.

4. Дата окончания испытания: 2025 г.

5. Место проведения испытания: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), кафедра «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии», лаборатория «Системы управления солнечно-дизельными комплексами».

6. Результаты испытания

Подсистема мониторинга испытательного стенда «Гибридная СНЭ» позволяет производить выгрузку наблюдаемых показателей, а именно разрядного или зарядного тока, напряжения на клеммах системы накопления, мощности заряда или разряда СНЭ и уровня заряда системы накопления энергии. В рамках данного опыта проведена непрерывная запись данных с изменением рабочего режима СНЭ: изначальный режим разряда на нагрузку случайной длительности переходит в режим заряда системы накопления. Собранные в ходе эксперимента данные представляют собой CSV-файлы с количеством записей не менее одной, которая будет соответствовать начальному состоянию системы. Общее количество данных определяется длительностью эксперимента. Пример вывода данных приводится в таблицах 1-.

Таблица 1 – Пример фиксации показателей тока системой мониторинга гибридной СНЭ

Метка времени, чч:мм:сс	Ток, А
14:00:19	4,300000191
14:00:21	4,300000191
14:00:35	4,400000095
14:00:41	4,300000191
14:00:47	4,400000095
14:00:53	4,300000191
14:00:59	5,300000191

Продолжение таблицы 1

Метка времени, чч:мм:сс	Ток, А
14:01:01	6,300000191
14:01:03	5,300000191
14:01:05	4,800000191
14:01:07	4,400000095
14:01:09	4,199999809
14:01:11	4,099999905
14:01:13	4
14:01:17	3,900000095
14:01:21	4
14:01:23	4,199999809
14:01:25	4,300000191
14:01:27	4,400000095
14:01:33	4,300000191
14:01:35	4,199999809
14:01:41	4,300000191
14:01:43	4,400000095
14:01:45	4,300000191
14:01:55	-13,60000038
14:01:57	-15,80000019
14:02:03	-15,69999981
14:02:05	-15,80000019
14:02:07	-15,60000038

Таблица 2 – Пример фиксации показателей напряжения системой мониторинга гибридной СНЭ

Метка времени, чч:мм:сс	Напряжение, В
13:57:01	57,75
13:57:03	57,74000168
13:57:05	57,75
13:57:13	57,74000168
13:57:15	57,75
13:57:19	57,74000168
13:57:21	57,75
13:59:17	57,75999832
14:00:19	57,72999954
14:00:29	57,74000168
14:00:39	57,75
14:00:49	57,75999832
14:00:59	57,81999969
14:01:01	58,54000092
14:01:03	58,77000046
14:01:05	58,75999832

Продолжение таблицы 2

Метка времени, чч:мм:сс	Напряжение, В
14:01:07	58,63000107
14:01:09	58,45999908
14:01:11	58,29000092
14:01:13	58,11999893
14:01:15	57,97999954
14:01:17	57,84999847
14:01:19	57,72999954
14:01:21	57,66999817
14:01:23	57,65999985
14:01:25	57,68999863
14:01:27	57,72000122
14:01:29	57,75
14:01:31	57,77999878
14:01:35	57,75
14:01:37	57,72000122
14:01:41	57,70999908
14:01:43	57,72999954

Таблица 3 – Пример фиксации показателей мощности системой мониторинга гибридной СНЭ

Метка времени, чч:мм:сс	Мощность СНЭ, Вт
13:57:01	254,1000061
13:57:03	254,0559998
13:57:05	254,1000061
13:57:13	254,0559998
13:57:15	254,1000061
13:57:19	254,0559998
13:57:21	254,1000061
13:59:17	254,1439972
14:00:19	259,7850037
14:00:21	248,2389984
14:00:29	248,2819977
14:00:35	254,0559998
14:00:39	254,1000061
14:00:41	248,3249969
14:00:47	254,1000061
14:00:49	254,1439972
14:00:53	248,3679962
14:00:59	306,4460144
14:01:01	368,802002
14:01:03	311,4809875
14:01:05	282,0480042

Продолжение таблицы 3

Метка времени, чч:мм:сс	Мощность СНЭ, Вт
14:01:07	257,9719849
14:01:09	245,5319977
14:01:11	238,9889984
14:01:13	232,4799957
14:01:15	231,9199982
14:01:17	225,6150055
14:01:19	225,1470032
14:01:21	230,6799927
14:01:23	242,1719971

Таблица 4 – Пример фиксации показателей тока системой мониторинга гибридной СНЭ

Метка времени, чч:мм:сс	SOC, %
14:02:48	99,90000153
14:03:48	99,80000305
14:04:22	99,69999695
14:04:46	99,59999847
14:05:09	99,5
14:05:31	99,40000153
14:05:55	99,30000305
14:06:17	99,19999695
14:06:39	99,09999847
14:07:03	99
14:07:25	98,90000153
14:07:49	98,80000305
14:08:11	98,69999695
14:08:33	98,59999847
14:08:55	98,5
14:09:17	98,40000153
14:09:35	98,30000305
14:09:53	98,19999695
14:10:11	98,09999847
14:10:29	98
14:10:48	97,90000153
14:11:06	97,80000305
14:11:24	97,69999695
14:11:46	97,59999847
14:12:02	97,5
14:12:20	97,40000153
14:12:38	97,30000305
14:12:58	97,19999695
14:13:16	97,09999847
14:13:34	97
14:13:52	96,90000153

7. Замечания и рекомендации

Замечания и рекомендации отсутствуют.

Испытание проводили

Инженер-исследователь лаборатории СУ СДК

Харитонов В.Ю.

Инженер-исследователь лаборатории СУ СДК

Пономарев И.Ф.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результирующие показатели выполнения работ

Таблица Е.1 – Результирующие показатели выполнения работ

Показатель	План на 2025 год	Выполнение
Прочие публикации в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук	1	<p>1) Васильева А.А., Васьков А.Г., Харитонов В.Ю., Харитонов Д.А. Оценка применимости методов расчета характеристики расхода топлива дизельгенераторной установки // Энергосбережение и Водоподготовка. № 1 (153), февраль 2025. С. 27-33. URL: https://www.energija.ru/153-2025-1/;</p> <p>2) L. Guo and A. G. Vaskov, "Modeling of Photovoltaic Grid-Connected System Based on PSCAD," 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 155-160, doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.1102832;</p> <p>3) A. Vasileva, A. Vaskov and P. Shurkalov, "Mathematical Modeling of Operating Modes of the Diesel Power Plant," 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 171- 176, doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028236</p>
Доклады на ведущих международных научных (научно-практических) конференциях в Российской Федерации и за рубежом	2	<p>1) L. Guo and A. G. Vaskov, "Modeling of Photovoltaic Grid-Connected System Based on PSCAD;</p> <p>2) A. Vasileva, A. Vaskov and P. Shurkalov, "Mathematical Modeling of Operating Modes of the Diesel Power Plant;</p> <p>3) Андреева К.А. Работа солнечнодизельных комплексов на резкопеременную нагрузку;</p> <p>4) Го Лицунь Моделирование фотоэлектрических систем, подключенных к сети в программном комплексе PSCAD;</p> <p>5) Клишин П.П. Программный комплекс для обоснования параметров объектов микрогенерации на основе солнечных электростанций</p>
Количество исследователей в возрасте до 39 лет	70 %	Над отчетом работало 14 человек, из них 12 (85,7 %) – младше 39 лет

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Подготовленные в рамках выполнения НИОКР публикации

1) Васильева А.А., Васьков А.Г., Харитонов В.Ю., Харитонов Д.А. Оценка применимости методов расчета характеристики расхода топлива дизель-генераторной установки // Энергосбережение и Водоподготовка, № 1 (153), 2025. С. 27-33.
<https://www.energija.ru/153-2025-1/>.

№ 1 (153), 2025

Энергосбережение и
Водоподготовка

Keywords: temperature, microclimate, thermal regime, radiant heat gain, initial heating, temperature wave

References

1. Mansurov R.Sh., Rafalskaya T.A., Efimov D.I. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers. E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. P. 06007.
2. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. P. 012049.
3. Rafalskaya T.A. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating modes. Journal of Physics: Conference Series. XXXV Siberian Thermophysical Seminar, STS 2019. 2019. P. 012140.
4. Bogoslovsky V.N. Stroitel'naya teplofizika [Building thermal physics]. 3rd ed. St.Petersbourg : "AVOK SEVERO-ZAPAD" Publishers, 2006. 400 p. (In Russian)
5. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement. Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. Pp. 219 – 228.
6. Belous A.N., Kotov G.A., Belous O.E., Garanzha I.M. Calculation of heat resistance of external enclosing structures with heat-conducting inclusions. Magazine of Civil Engineering. 2022. 113(5). Article No. 11313.
7. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. 4 (96). Pp. 27 – 41.
8. Samarin O.D., Kiochko A.K. Resheniye zadach nestacionarnoy teploperedachi, energosberezheniya i upravleniya klimaticheskimi sistemami [Solving problems of non-stationary heat transfer, energy saving and control of climate systems]. Moscow : MISI-MGSU Publishers, 2022. 93 p. (In Russian)
9. Samarin O.D. Eksperimental'noye podtverzheniye teoreticheskikh zavisimostey dlya temperatury vozdukhа v pomeshchenii pri avtomaticheskoy regulirovani klimaticheskikh system [Experimental confirmation of theoretical dependences for indoor air temperature under automatic control of climate systems] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2021. No.1. Pp. 37 – 42. (In Russian)

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДА ТОПЛИВА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

А.А. ВАСИЛЬЕВА, инженер-исследователь лаборатории
VasilyevaAAI@mpel.ru
А.Г. ВАСЬКОВ, канд. техн. наук, доцент
В.Ю. ХАРИТОНОВ, инженер-исследователь лаборатории
Д.А. ХАРИТОНОВ, инженер-исследователь лаборатории

A.A. VASILEVA, Research Engineer,
A.G. VASKOV, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor
V.Yu. KHARITONOV, Research Engineer
D.A. KHARITONOV, Research Engineer

«Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт», Россия, Москва
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow

Аннотация. В данной статье рассмотрены существующие способы расчета удельного и абсолютного расхода дизельного топлива, проведено моделирование работы дизельной электростанции с использованием разных методов расчета топливных характеристик и оценена разница подходов к определению расхода дизельного топлива по сравнению с реальными характеристиками условно «Отечественных» установок и условно «Зарубежных». По данным моделирования было получено, что наиболее точными моделями для всех дизель-генераторных установок являются модель Лонмади 2 и методика Минэнерго, при этом метод расчета Лонмади 2 немного точнее для «Отечественных» установок (в среднем на 1%), а Минэнерго – для «Зарубежных» (на 3%).

Ключевые слова: гибридные комплексы, математическое моделирование, дизель-генераторные установки, расход дизельного топлива, дизельная электростанция

При прогнозировании работы энергетических комплексов очень важно иметь достоверные верифицированные математические модели генерирующего оборудования, так как от этого зависит точность и адекватность полученных результатов, надежность системы и экономическая составляющая проекта. В частности, при проектировании и прогнозировании изолированных энергосистем необходимо иметь точное представление о расходе топлива на дизель-

генерирующих установках, так как для данных территорий объем используемого топлива является критическим параметром. Улучшение прогнозирования и математического моделирования работы дизельных электростанций поможет избежать перерасхода дизельного топлива, воровства и обеспечить запас топлива.

Для определения объема потребления дизельного топлива можно использовать 2 величины: абсолютный расход дизельного топлива (В, л/ч) и удельный расход

Исследования, проектирование, расчеты

27

дизельного топлива (b , г/кВт·ч). Для сравнения разных видов топлива используют такую величину как условное топливо, то есть топливо, при сжигании 1 кг которого выделяется 7 000 ккал тепла. Для перевода удельного расхода дизельного топлива в удельный расход условного топлива вводится коэффициент:

$$k_{\text{усл}} = \frac{Q_d}{Q_{\text{усл}}} = \frac{10180}{7000} \approx 1$$

Тогда удельный расход условного топлива рассчитывается по формуле (1):

$$b_{\text{усл}} = b \cdot k_{\text{усл}}. \quad (1)$$

Абсолютный расход дизельного топлива (АРДТ) помогает определить, какой объем топлива тратится на электростанции. Он практически прямо пропорционален нагрузке на валу дизель-генераторной установки (ДГУ). Удельный расход дизельного/условного топлива (УРДТ/УРУТ) позволяет определить, насколько эффективно работает оборудование. Он имеет практически обратную зависимость от нагрузки на валу ДГУ. Между собой данные параметры находятся в обратной зависимости, выраженной формулой (2):

$$b = \frac{B \cdot \rho}{N_{\phi}}, \quad (2)$$

где ρ – плотность дизельного топлива, можно принять 860 кг/м³; N_{ϕ} – фактическая средняя нагрузка за расчетный период, кВт.

Существует множество способов расчета абсолютного и удельного топлива. Различия в результатах, полученных при расчетах по разным методикам может иметь серьезные последствия, так как объем потребления дизельного топлива является основной статьей расхода на дизельных электростанциях. Рассмотрим существующие методы расчета абсолютного и удельного расхода дизельного топлива на электростанциях и оценим их различия.

Рассмотрим некоторые способы расчета расхода дизельного топлива, которые можно найти в открытых источниках.

АО Лонмади [1] предлагает 2 способа расчета. В первом способе используется следующая формула:

$$b = \frac{b_{\text{ном}} \cdot H \cdot C \cdot 1,36}{\eta_r}, \quad (3)$$

где $b_{\text{ном}}$ – удельный расход топлива при 75 % от номинальной мощности (по паспорту); H – коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива от нагрузки; C – коэффициент изношенности двигателя (таблица 1); η_r – КПД генератора в зависимости от режима работы.

Таблица 1. Коэффициенты нагрузки и износа двигателя

$N_{\phi}/N_{\text{ном}}, \%$	Коэффициент H	Коэффициент C
100	1,00	1,015-1,020
95	1,025-1,035	1,020-1,030
90	1,030-1,040	1,030-1,035
85	1,040-1,055	1,030-1,040
80	1,050-1,055	1,035-1,045
75	1,050-1,065	1,035-1,050
70	1,055-1,060	1,040-1,050
65	1,060-1,075	1,040-1,050
60	1,070-1,080	1,050-1,060
50	1,085-1,090	1,050-1,070
40	1,115-1,125	1,060-1,080

Вторая методика расчета:

$$b = \frac{1,05 \cdot K \cdot b_{\text{ном}}}{\eta_r}, \quad (4)$$

где $K = 0,87 + \frac{0,13 \cdot N_{\text{ген}}}{N_{\text{ср}}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение расхода по причине колебания нагрузки.

Недостаток данного способа расчета заключается в том, что неизвестно, каким образом получены коэффициенты из таблицы 1 и каким способом их следует выбирать. Также данные методы могут применяться только в области нагрузок от 40% до 100%.

В «Порядке определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии», утвержденном приказом Министерства Энергетики РФ № 323 30 декабря 2008 г. приводится следующая формула:

$$b_{\text{ДГУ}} = b_{\text{ном}}^{\text{ДГ}} \cdot K_{\text{реж}} \cdot K_{\text{изн}} \cdot \frac{Q_p^{\text{н}}}{7000}, \quad (5)$$

где $b_{\text{ном}}^{\text{ДГ}} = \frac{b_{\text{ном}}^{\text{а}}}{\eta_{\text{ном}}^{\text{г}}}$ – показатель расхода топлива

ДГУ, скорректированный на КПД генератора, г/кВт·ч; $b_{\text{ном}}^A$ – показатель расхода топлива по дизелю; $\eta_{\text{ном}}^r$ – паспортный КПД генератора; $K_{\text{реж}}$ – режимный коэффициент, определяется по формуле (6) для нагрузки от 25% до номинальной; $K_{\text{изн}}$ – коэффициент износа, учитывает фактический износ ДГУ и может принимать значения от 1,00 до 1,05; $Q_p^H = 10180$ ккал/кг – теплота сгорания топлива.

$$K_{\text{реж}} = 0,9 + \frac{0,1 \cdot N_{\text{ном}}}{N_{\Phi}}, \quad (6)$$

где N_{Φ} – средняя прогнозируемая нагрузка ДГУ за соответствующий период [кВт]; $N_{\text{ном}}$ – паспортная мощность ДГУ [кВт].

Преимущество данного метода в том, что он опирается на паспортные данные конкретных установок. Как можно заметить, данный способ расчета схож со вторым методом расчета АО «Лонмади», формула (4). Недостатки данного метода: подходит только для ДГУ с небольшим износом (до 5%), а также неизвестно, каким образом был выведен режимный коэффициент.

В зарубежной литературе часто можно встретить расчет режимов работы и выбора оборудования солнечно-дизельного комплекса в программе Nomer. Для расчета абсолютного расхода топлива ДГУ в л/ч в этой программе используется уравнение [2]:

$$B = A_G \cdot N_{\Phi} + B_G \cdot N_{\text{ном}}, \quad (7)$$

где N_{Φ} , $N_{\text{ном}}$ – соответственно выходная и номинальная мощности ДГУ [кВт]; A_G , B_G – коэффициенты кривой расхода топлива [л/кВт·ч]. Как правило значения этих коэффициентов принимаются: $A_G = 0,246$ л/кВт·ч и $B_G = 0,08145$ л/кВт·ч [3].

Формулу (7) именно с этими коэффициентами можно встретить в очень большом количестве зарубежных статей, в частности в тех, в которых рассчитывается экономическая составляющая проекта. Примеры таких статей [3–11], самая старая датируется 1989 годом, а самая новая – 2024.

Недостаток данного метода заключается в том, что он не учитывает различия номинальных абсолютных расходов ДГУ и КПД генератора в зависимости от модели, а также неизвестно, каким образом получены коэффициенты A_G и B_G .

Например, в [12] предлагаются другие коэффициенты A_G и B_G для расчетов, а именно: $A_G = 0,222$ л/(кВт·ч) и $B_G = 0,027$ л/кВт·ч.

Еще один метод расчета представлен в диссертации Гринкруга Якова Соломоновича «Управление режимами работы дизельных электростанций в автономных сетях электроснабжения». Он основан на аппроксимации характеристик 31 вида ДГУ различной мощности, используемых в Хабаровском крае, а формула имеет вид:

$$b = \left(A_G \cdot \left(\frac{N_{\Phi}}{N_{\text{ном}}} \right)^{B_G} + C_G \right) \cdot b_{\text{ном}}, \quad (8)$$

где $A_G = 0,0811$; $B_G = -1,385$; $C_G = 0,912$; $b_{\text{ном}}$ – удельный расход дизельного топлива по паспорту.

Преимущества метода состоят в том, что он прозрачен, известны марки ДГУ и погрешность метода. Недостатками можно считать то, что в выборке отсутствуют иностранные ДГУ, а также то, что она была выведена около 20 лет назад, то есть параметры уравнения (8) могут не подходить для более современных установок.

Выше описаны только некоторые методы расчета расхода дизельного топлива из множества существующих. Проведем сравнение данных методик с реальными характеристиками расхода ДГУ, имеющихся в распоряжении Полигона ВИЭ НИУ «МЭИ».

Паспортные данные установок представлены в таблице 2. Коэффициенты износа были приняты в соответствии с отклонением реальной характеристики от паспортной в точке номинальной мощности. ДГУ 12 и 30 кВт произведены на Минском моторном заводе, их можно считать условно «Отечественными», ДГУ 36 кВт произведены компанией Perkins, их можно считать «Зарубежными».

Таблица 2. Информация о ДГУ

Мощность ДГУ, кВт	УРД T _{ном} , г/кВт·ч	КПД генератора, о.е.	Плотность топлива, кг/м ³	Износ, %
12	226	0,882	860	73
30	226	0,885	860	0
36	216	0,905	860	-5
36	216	0,905	860	3

Рассчитаем удельные и абсолютные формулам (3-8) и сравним их в таблице 3.
характеристики расхода топлива по

Таблица 3. Абсолютные и относительные погрешности определения расхода дизельного топлива

	Лонмади 1		Лонмади 2		Минэнерго		Зарубежная 1		Зарубежная 2		Гринкруг	
ДГУ	Δ, л/ч	δ, %	Δ, л/ч	δ, %	Δ, л/ч	δ, %	Δ, л/ч	δ, %	Δ, л/ч	δ, %	Δ, л/ч	δ, %
1	1,2	21,5	-0,3	-8,7	-0,6	-14,8	0,2	3,0	-1,3	-28,4	-1,0	-23,4
2	2,2	33,3	0,1	-0,1	-0,3	-6,8	0,8	13,2	-1,3	-21,4	-1,0	-16,0
3	2,5	42,8	0,5	9,3	0,1	1,0	1,8	37,4	-0,5	-8,6	-0,4	-4,8
4	2,6	37,5	-0,2	-3,2	-0,1	-2,9	1,8	31,0	-0,7	-12,2	-0,6	-8,8
Ср.	2,13	33,78	0,03	-0,68	-0,23	-5,88	1,15	21,15	-0,95	-17,65	-0,75	-13,25

Как видно по таблице 3 и по рисункам 1-8, в среднем самой точной методикой расчета является Лонмади 2 (4), затем методика Минэнерго (5) и Гринкруга (8). При этом при большом износе оборудования (ДГУ №1 12 кВт) самой точной оказалась зарубежная методика (7).

Для оценки влияния различия результатов, полученных по разным методикам расчета, и точности этих методик для «Отечественных» и «Зарубежных» установок, было проведено моделирование режима работы дизельной электростанции. Алгоритм, описывающий работу программы расчета, разработан Молодежной лабораторией «СУ СДК» НИУ

«МЭИ» и представлен в [13]. Почасовые графики нагрузки, на основе которых проводилось моделирование, представлены на рисунках 9-10. Первый график нагрузки имеет пиковую нагрузку 40 кВт, представлены характерные дни сезонов (зима, весна, лето, осень) с учетом работы ДГУ 12 и 30 кВт параллельно и по отдельности. Второй график построен аналогично с учетом параллельной работы идентичных ДГУ 36 кВт (пиковая нагрузка 67 кВт). Результаты моделирования представлены на рисунках 11-14, абсолютные и относительные погрешности расчетов представлены в таблицах 4-5.

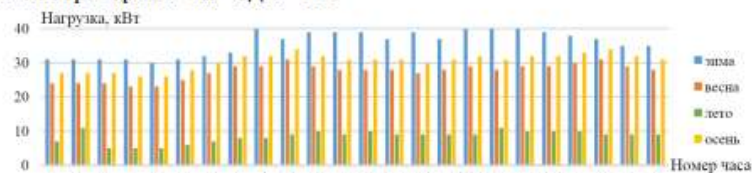


Рисунок 9. График нагрузки для работы ДГУ 30 и 12 кВт

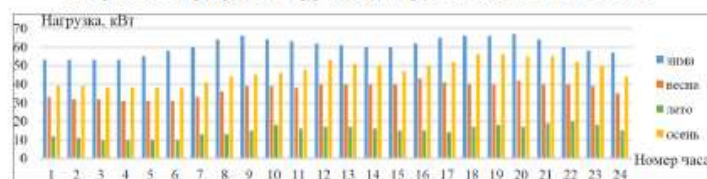


Рисунок 10. График нагрузки для работы двух ДГУ 36 кВт

УРДТ за расчетный период для 1 ДГУ определяется по формуле (9):

$$b_{\text{расч}} = \frac{\sum (b \cdot \varepsilon)}{\sum \varepsilon}, \quad (9)$$

где ε – произведенная энергия за расчетный

период, кВт·ч. Для нескольких ДГУ значение b определяется как средневзвешенный УРДТ.

Представим полученные значения в таблицах 4-5.

Таблица 4. Результаты моделирования по графику нагрузки пиковой мощностью 39 кВт

	Эксперимент	Метод (3)	Метод (4)	Метод (5)	Метод (6)	Метод (7)	Метод (8)
УРДТ, г/кВт·ч	343	478	351	332	377	255	292
АРДТ, л	981,1	1364,7	1002,3	948,2	1076,2	727,9	835,5

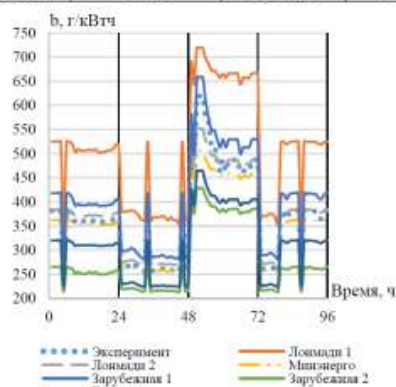


Рисунок 11. УРДТ по 1 графику нагрузки

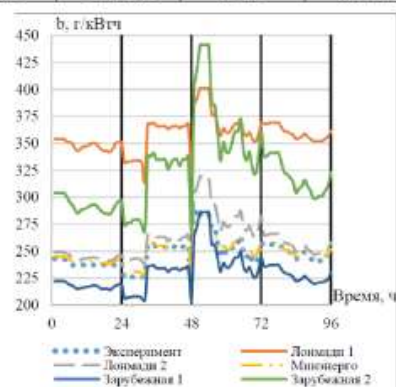


Рисунок 13. УРДТ по 2 графику нагрузки

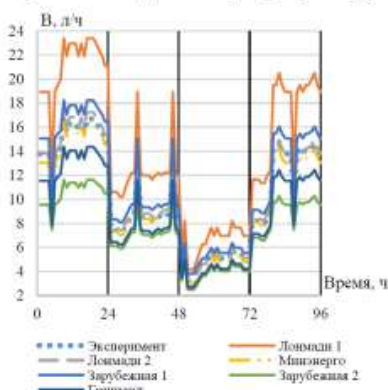


Рисунок 12. АРДТ по 1 графику нагрузки

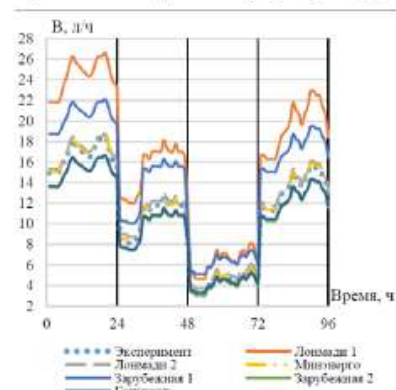


Рисунок 14. АРДТ по 2 графику нагрузки

Таблица 5. Результаты моделирования по графику нагрузки пиковой мощностью 39 кВт

	Эксперимент	Метод (3)	Метод (4)	Метод (5)	Метод (6)	Метод (7)	Метод (8)
УРДТ, г/кВт·ч	244	355	254	246	311	222	225
АРДТ, л	1086,9	1577,2	1128,3	1096,6	1384,9	987,9	999,5

Заключение

В данной статье было рассмотрено шесть способов расчета удельного и абсолютного расхода дизельного топлива, были проведены расчеты режимов работы дизельной электростанции с учетом разных методов расчета расхода дизельного

топлива в зависимости от нагрузки на валу ДГУ. В результате было определено, что способ расчета характеристики расхода дизельного топлива существенно влияет на результаты моделирования и большинство предложенных методов имеют среднее отклонение от реальных значений расхода

более, чем на 10%. Рекомендуется при расчетах расхода дизельного топлива пользоваться методикой Министерства энергетики РФ, формула (5), или методикой Лонмади 2, формула (4), так как они наиболее точно описывают характер изменения расхода дизельного топлива при нагрузке ДГУ, отличной от номинальной, как для «Отечественных» ДГУ, так и для «Зарубежных» производителей.

Исследование проводилось в рамках проекта "Разработка теоретических основ построения гибридных систем накопления энергии для автоматизированных гибридных энергетических комплексов", поддержанного грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWF-2025-0003.

Список источников (References)

1. www.jcbgenerators.ru/tekhnicheskaya-biblioteka/kak-schitaetsya-raskhod-topliva-dizelnogo-generatora.html.
2. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. Micropower System Modeling with Homer // Integration of Alternative Sources of Energy. 1st ed. / ed. Farret F.A., Simões M.G. Wiley, 2005. pp. 379–418.
3. Ismail M.S., Moghavvemi M., Mahlia T.M.I. Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 69. pp. 163–173.
4. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms // Solar Energy. 2005. Vol. 79, № 1. pp. 33–46.
5. Skarstein Ø., Uhlen K. Design Considerations with Respect to Long-Term Diesel Saving in Wind/Diesel Plants // Wind Engineering. Sage Publications, Ltd., 1989. Vol. 13, № 2. pp. 72–87.
6. Mohammed A. et al. A review of process and operational system control of hybrid photovoltaic/diesel generator systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 44. pp. 436–446.
7. Dennis Barley C., Byron Winn C. Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems // Solar Energy. 1996. Vol. 58, № 4. pp. 165–179.
8. Sharafi M., ElMekawy T.Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach // Renewable Energy. 2014. Vol. 68. pp. 67–79.
9. Nair S.P., Sundari M.S.S. Optimizing day-ahead energy management with demand response in a PV-diesel-battery system using a hybrid GOA-SNN strategy // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 76. P. 109717.
10. Elfatah A.A. et al. Energy management of hybrid PV/diesel/battery systems: A modified flow direction algorithm for optimal sizing design — A case study in Luxor, Egypt // Renewable Energy. 2023. Vol. 218. P. 119333.
11. Sari A. et al. New optimized configuration for a hybrid PV/diesel/battery system based on coyote optimization algorithm: A case study for Hotan county // Energy Reports. 2022. Vol. 8. pp. 15480–15492.
12. Manwell J.F. et al. Potential for Wind Energy Development on New England Islands. Renewable Energy Research Laboratory Center for Energy Efficiency and Renewable Energy Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Massachusetts at Amherst, 2003. P. 94.
13. Vaskov A., Sigel A., Shurkalov P. A Software Package for Optimization of a Solar-Diesel Complex Operation Mode // 2024 7th International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). 2024. pp. 1–6.

ESTIMATION OF APPLYING CALCULATION METHODS FOR DIESEL-GENERATOR SET FUEL CONSUMPTION CURVE

Abstract. This article considers the existing calculation methods of specific and absolute diesel fuel consumption, modeling of diesel power plant operation using different methods of calculation of fuel characteristics and evaluates the difference of approaches to determining diesel fuel consumption compared to the real characteristics of relatively "Domestic" installations and relatively "Foreign" ones. According to the modeling data, it was obtained that the most accurate models for all diesel generator sets are the Lonmadi 2 model and the methodology of the Ministry of Energy, whereas the Lonmadi 2 calculation method is slightly more accurate for "Domestic" sets (by 1% on average), and the Ministry of Energy - for "Foreign" ones (by 3%).

Keywords: hybrid complexes, mathematical modeling, diesel generator sets, diesel fuel consumption, diesel power plant

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

В.А. ШЕЛЕСТ¹, канд. техн. наук, доцент

vshelest@donstu.ru

Н.И. ЦЫГУЛЁВ², д-р техн. наук, профессор

V.A. SHELEST¹, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

N.I. TSYGULYOV², Dr. Sci. (Tech.), Professor

¹«Донской государственный технический университет», Россия, г. Ростов-на-Дону

Исследования, проектирование, расчеты

2) L. Guo and A. G. Vaskov, "Modeling of Photovoltaic Grid-Connected System Based on PSCAD," 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 155-160, doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028328. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11028328>.

2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)

Modeling of Photovoltaic Grid-Connected System Based on PSCAD

Liqun Guo

Institute of Hydropower and Renewable Energy
National Research University "MPEI"
Moscow, Russia
litsyun@mail.ru

A.G. Vaskov

Institute of Hydropower and Renewable Energy
National Research University "MPEI"
Moscow, Russia
VaskovAG@mpei.ru

Abstract—According to the physical model of photovoltaic cell and the output characteristics of photovoltaic matrix under different light intensity and ambient temperature, the maximum power tracking control based on the Boost scheme is analyzed. The working principle of the inverter connected to the photovoltaic grid is analyzed, and a three-phase photovoltaic system connected to the photovoltaic grid is built in PSCAD. Using the simulation software in PSCAD, a photovoltaic power plant model is built. And the process of connecting to the grid is simulated, its impact on the power quality of the grid in different situations is analyzed, and finally, possible solutions are proposed and the simulation is verified.

Keywords—photovoltaic energy production; photovoltaic system simulation; process connection control; power quality

I. INTRODUCTION

With the gradual depletion of fossil energy and the increasing pollution, obtaining sufficient renewable energy has become an urgent goal that people are pursuing. As a clean and unlimited new energy source, solar energy is safer than nuclear energy, more abundant than hydropower, has a wide distribution area, and does not cause any harm to the environment. However, due to the expensive initial investment, the price of photovoltaic electricity is much higher than that of conventional electricity. In recent years, with the upgrading of photovoltaic cell production technology, the cost of photovoltaic power generation has gradually decreased. At the same time, distributed photovoltaic power has also achieved exponential growth, with the advantages of easy installation and proximity to users[1].

In line with this general trend, this article introduces the composition of photovoltaic power generation systems and the principles of grid connection. At the same time, a PSCAD model of a photovoltaic power generation system was constructed and its impact on the power quality of the connected distribution network was simulated.

II. SIMULATION MODEL OF A PHOTOVOLTAIC CELL

Since photovoltaic cells are strongly affected by changes in the external environment, their output current and power have nonlinear characteristics. Fig. 1 is an equivalent circuit diagram of a photovoltaic cell. The main components include an ideal current source I_{ph} , a parallel diode D , a series resistor R_s , and a parallel resistor R_{sh} [2].

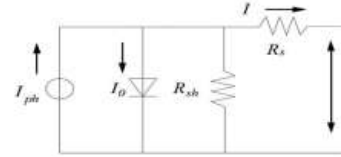


Fig. 1. Schematic diagram of a photovoltaic cell.

The mathematical theoretical model for the analysis of photovoltaic cells is as follows, the approximate equivalent model is based on the open-circuit voltage U_{oc} , short-circuit current I_{sc} , voltage U_{mref} and current I_{mref} of one photovoltaic cell at a known nominal ambient temperature $T_{ref} = 25$ degrees and nominal illuminance $S_{ref} = 1000$ W/m² [3]:

$$I = I_{sc}(1 - C_1(e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1)) \quad (1)$$

$$C_1 = (1 - I_m/I_{sc})e^{\frac{-U_m}{C_2 U_{oc}}} \quad (2)$$

$$C_2 = (\frac{U_m}{U_{oc}} - 1) / \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \quad (3)$$

$$U_{oc} = (1 - (T - T_{ref})r) * \ln(e + b(\frac{S}{S_{ref}} - 1)) \quad (4)$$

$$U_m = (1 - (T - T_{ref})r) * \ln\left(e + b\left(\frac{S}{S_{ref}} - 1\right)\right) * U_{mref} \quad (5)$$

$$I_{sc} = I_{scref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a(T - T_{ref})) \quad (6)$$

$$I_m = I_{mref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a(T - T_{ref})) \quad (7)$$

In the above formula, a is the temperature coefficient of change of the output current of the photovoltaic cell under standard light intensity, b is the temperature coefficient of change of the output voltage of the photovoltaic cell under standard light intensity; T and S represent the real-time temperature and light intensity, respectively.

Based on the above mathematical theoretical analysis, the model of photovoltaic cell built on the platform is shown in Fig. 2.

The research was carried out within the framework of the project "Development of theoretical foundations for designing hybrid energy storage systems for automated hybrid energy complexes" supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № FSWF-2025-0003.

979-8-3315-1219-4/25/\$31.00 ©2025 IEEE

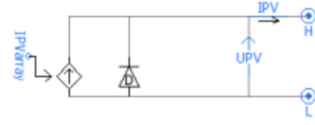


Fig. 2. Simulation diagram of a photovoltaic cell.

III. MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) TECHNOLOGY AND ITS IMPLEMENTATION METHOD

Solar photovoltaic maximum power point tracking technology can keep photovoltaic cells in the best working state, that is, at the maximum output power [4–7]. In practice, the conductance increment method is often used to achieve MPPT control. The principle is to use the difference between the output power and the output voltage at the maximum power point to be 0, thereby deriving the equation.

The instantaneous output power of the photovoltaic cell is:

$$P = UI \quad (8)$$

of the photovoltaic cell to be the same as the equivalent internal resistance of the photovoltaic cell, the external load can obtain the maximum power, achieving the purpose of tracking the maximum power point of the photovoltaic cell [9]. The working principle of the BOOST chopper circuit is shown in Fig. 4.

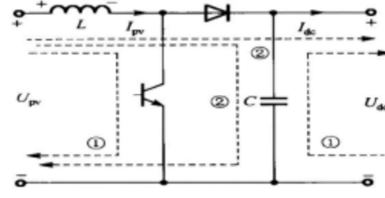


Fig. 4. MPPT Simulation model.

The control process is as follows: the values of the output current and voltage of the photovoltaic array are determined, where the capacitor voltage C is equal to the actual output voltage of the photovoltaic array, and the current value of the output power of the photovoltaic array is equal to the received

ph
wc
is c

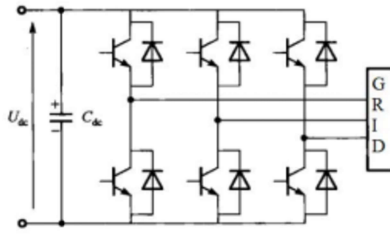


Fig. 6. Three-phase voltage grid inverter.

The control of the DC/AC inverter includes a voltage loop and a current loop. The voltage loop inputs a set value U_{dc} , and by comparing it with the actually measured value U_{dc} , a reference current i^* of the set value is obtained at the output. When the actually measured voltage value is lower than the set value, the reference value of the output current of the inverter increases, and conversely, the reference value of the output current decreases, thereby controlling the output power of the inverter. Thanks to the phase-locked loop (PLL), the output reference current i^* on the AC side of the inverter and the system voltage can have the same frequency and phase. The hysteresis comparator compares the output reference current i^* on the AC side of the inverter with the instantaneous current i_{grid} of the inverter, and compares the generated current difference with the set hysteresis width for state control and the frequency of the switch tube S, so as to realize the real-time tracking of the standard sinusoidal reference current [11].

Fig

un
con
inv
A.

adv
bo
Af
thr
rec
S i

The power quality control structure of the photovoltaic system is shown in Fig. 7. The output voltage and output current go through dq transformation, dual-loop control, pq inverse transformation and sinusoidal PWM in sequence, and finally act on the inverter-controlled switch [12].

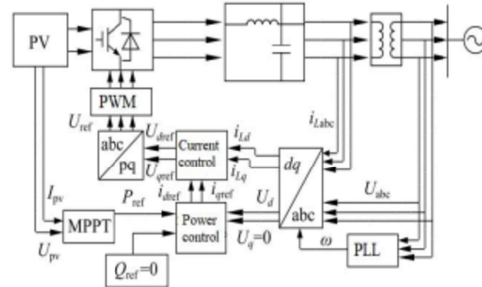


Fig. 7. Management structure for connecting a photovoltaic system to the grid.

Since the maximum output power of the photovoltaic power generation system depends on the real-time light intensity and temperature and cannot be set arbitrarily, the input signal P_{ref} of the control loop is set to the maximum output power of the photovoltaic system after MPPT control. In practice, the power grid generally does not need photovoltaic power plants to participate in reactive power

regulation. Therefore, the photovoltaic system can only transmit active power, and the reactive power reference value Q_{ref} can be set to 0, that is, the power factor is 1.

The simulation model in PSCAD is shown in Fig. 8.



Fig. 8. Simulation model of the DC/AC.

Thus, the model of a grid-connected distributed PV system is packaged as follows:

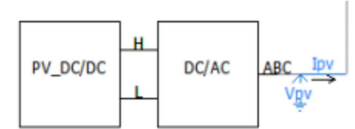


Fig. 9. Simulation model of the grid-connected distributed photovoltaic system.

V. SIMULATION ANALYSIS AND RESULTS ANALYSIS

Fig. 10 shows a simulation model of a distributed photovoltaic power source connected to a distribution grid. The entire system consists of a photovoltaic power generation device, a three-phase power grid, and a load.

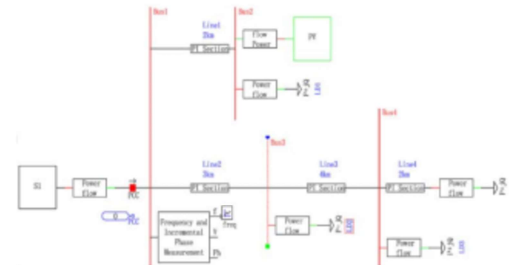


Fig. 10. Simulation model of the system.

A. Connection a Distributed Power Source

For ease of observation, only one distributed power source with the power specified in Tab. I is connected to branch 2.

TABLE I. POWER OF VARIOUS CONNECTED DISTRIBUTED POWER SOURCES

	1	2	3	4	5
$P_{PV}(\text{kW})$	100	200	500	1000	2000

The voltage obtained after connection is shown in Fig. 11.

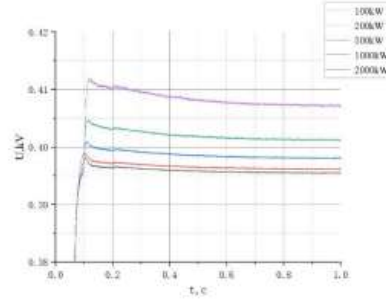


Fig. 11. Voltage waveform after connecting one PV power plant to the grid.

From Fig.11, the voltage deviation can be analyzed as shown in Tab. II. The table shows that the voltage deviation meets the power quality standards of both Russia and China. According to GOST 32144-2013, the permissible voltage deviation is $\pm 10\%$ of the nominal value. According to GB/T 12325-2017, the permissible voltage deviation in China is $\pm 7\%$ for three-phase networks [13–15].

TABLE II. VOLTAGE DEVIATION

PV (kW)	$\Delta U_{\text{Amplitude}}$ (kV)	$\Delta U_{\text{Steady-state}}$ (kV)	δ (%)
100	0.397	0.3955	1.125%
200	0.398	0.396	1 %
500	0.401	0.398	0.5%
1000	0.404	0.401	0.25%
2000	0.412	0.407	1.75%

Fig. 12 shows the frequency waveform diagram after connecting one PV power plant to the grid. From Fig.12, the frequency deviation can be analyzed as shown in Tab. III. Except for the photovoltaic power of 2000 kW, other cases meet the requirements. According to GOST 32144-2013, the frequency tolerance is ± 2 Hz under normal conditions and ± 4 Hz for short-term fluctuations. According to GB/T 12325-2017, the frequency tolerance in China is ± 2 Hz under normal conditions and ± 5 Hz for short-term fluctuations. And the final frequency is maintained at 50 Hz.

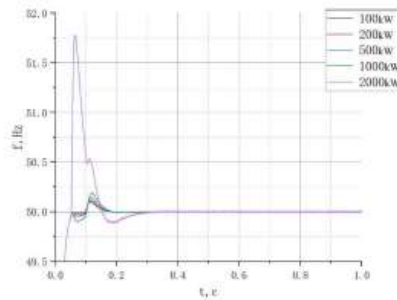


Fig. 12. Frequency waveform after connecting one PV power plant to the grid.

TABLE III. FREQUENCY DEVIATION

PV (kW)	$+\Delta f$ (Hz)	$-\Delta f$ (Hz)	t (s)
100	0.10	-0.02	0.19
200	0.11	-0.02	
500	0.14	-0.05	
1000	0.19	-0.10	
2000	1.78	-0.11	0.277

Fig. 13 shows the waveform diagram of the total harmonic distortion of the voltage on the grid-connected side after the PV power plant is connected to the grid. It can be seen from the figure that the maximum total harmonic distortion (THD) is 3.95% when the PV power is 2000 kW. In other cases, the THD is less than 2.5%. It is known that the Russian standard stipulates that THD should not exceed 8%, while China's standard is not more than 5%. Therefore they do not meet Chinese standards. The larger the distributed PV power connected to the grid, the higher the content of voltage harmonics injected into the system.

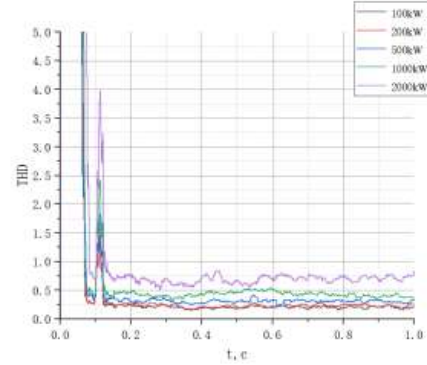


Fig. 13. Frequency waveform after connecting one PV power plant to the grid.

Therefore, it is necessary to install a filtering compensation device for harmonic compensation on this model to avoid the many dangers to the power grid caused by excessive harmonic content. In order to achieve the best filtering effect and eliminate the harmonics in the power grid as much as possible, the parameters of capacitance and inductance should be combined. LCL filters take into account both the compensation effect and lower cost, and can generally be used as the first choice for filters connected to the photovoltaic grid.

B. Connection a Distributed Power Source to Different Places

Connecting a distributed power source with the same power to different locations (That is, connections at the beginning - node 1, in the middle - node 3 and at the end of the line - node 4). The simulation results are shown below.

The voltage drops caused by the system harmonic current flowing from the feeder point to a certain node is the node voltage distortion. The closer the grid connection position is to

the end of the line, the greater the harmonic current flowing through the node, so the node voltage distortion is higher.

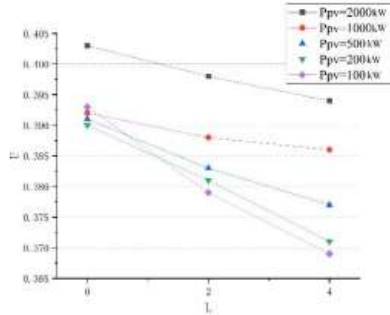


Fig. 14. Voltage waveform after connecting PV to different places.

TABLE IV. THE VALUE OF THD WHEN CONNECTING PV TO DIFFERENT PLACES

PV (kW)	THD		
	At the beginning	In the middle	At the end
100	1.33	1.38	1.45
200	1.46	1.56	1.63
500	1.80	1.92	2.18
1000	2.35	2.65	3.37
2000	3.43	3.69	5.48

When the connection point position changes, the harmonic current before the access point is almost unchanged, and the resulting harmonic voltage distortion is basically the same, that is, the voltage distortion before the connection point is basically not affected by the change in the connection point position. After the photovoltaic power source is connected to the grid, the closer the nodes of the same line to the end, the higher the degree of voltage distortion; The node voltage distortion rate increases rapidly before the grid connection, but increases slowly after the grid connection. When the grid connection point is at the end of the feeder, the total harmonic distortion level of the entire distribution network system is the highest. The larger the grid-connected power of the distributed photovoltaic power, the higher the voltage harmonic content contributed to the system, and the closer the node is to the node connected to the grid, the higher the total harmonic content. Only when the PV power is 2000 kW and connected to the end of the line, the THD value does not meet the standard.

C. Simultaneous Connection a PV and Consumers

Simultaneous connection of solar power plants and consumers in branch 1. Parameters are specified in Tab. V.

TABLE V. POWER OF VARIOUS CONNECTED PV AND CONSUMERS

PV (kW)	Pconsumer (kW)				
100	100	200	500	1000	2000
200					
500					
1000					
2000					

The simulation results are shown below.

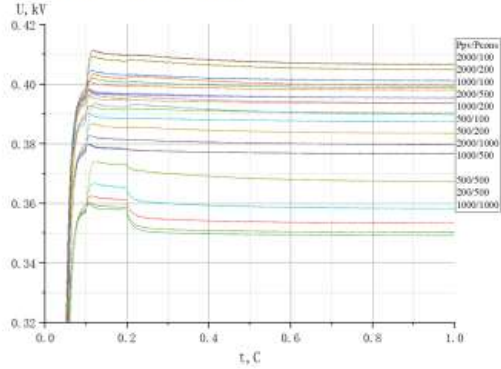


Fig. 15. Voltage waveform after connecting the PV and consumers.

The larger the power of the photovoltaic installation and the higher the ratio of the photovoltaic installation to the load, the more obvious the voltage boost effect will be at each node of the distribution network, and the higher the overall voltage level will be. The larger the power of the consumer, the greater the risk of the voltage falling below the lower limit, and the voltage support effect will not be good enough. In the worst case, the photovoltaic power is 100 kW and the consumer power is 2000 kW, and the voltage deviation is -12.75%, which does not meet the standard. When the voltage changes significantly after the distribution network is connected to the photovoltaic power source, it is necessary to limit the power connected to the grid, otherwise the voltage in the system may exceed the limit value.

TABLE VI. THE VALUE OF THD WHEN CONNECTING THE PV AND CONSUMERS

PPV (kW)/ Pcons (kW)	THD (%)	PPV (kW)/ Pcons (kW)	THD (%)	PPV (kW)/ Pcons (kW)	THD (%)
100/100	1.346	200/100	1.421	500/100	1.826
100/200	1.321	200/200	1.498	500/200	1.843
100/500	1.366	200/500	1.528	500/500	1.916
100/1000	1.427	200/1000	1.559	500/1000	1.894
100/2000	1.492	200/2000	1.578	500/2000	1.961
PPV (kW)/ Pcons (kW)	THD (%)	PPV (kW)/ Pcons (kW)	THD (%)		
1000/100	2.405	2000/100	3.958		
1000/200	2.426	2000/200	3.978		
1000/500	2.449	2000/500	3.982		
1000/1000	2.484	2000/1000	4.110		
1000/2000	2.621	2000/2000	4.209		

From Tab. VI it is clear that the greater the power of the PV and the smaller its ratio to the load, the greater the value of THD. And the maximum THD is achieved when the power of the PV and consumers is 2000 kW, which is equal to 4.209. And it meets the requirements.

VI. CONCLUSION

This paper establishes a photovoltaic power plant model based on the physical and mathematical model of photovoltaic cells by using PSCAD modeling software. The above simulation model is a dynamic and complete system model. It can not only describe the working conditions of the photovoltaic array under the change of the working environment, but also ensure the maximum output power of the photovoltaic array. It can be used for simulation studies of photovoltaic grid connection and energy storage. And it can also analyze the impact of changes in the power of the grid-connected solar power plant, grid connection points and load power on the change of voltage, frequency and harmonic content of the system.

If there is only one PV system connected to the distribution grid, the worst case is when its capacity is 2000 kW, the voltage deviation is 1.75%, the power deviation is 1.78 Hz, and the THD is 3.95%. When PV systems are connected to different points of the distribution grid, the smaller the distributed power of the PV systems, the less obvious the improvement in voltage in the system. If the distributed power source is connected centrally to the end of the system and its capacity is 2000 kW, the THD at the end will increase significantly to 5.48%. And this does not meet the standard requirements. When PV systems and consumers of different capacities are connected to the grid at the same time, the maximum voltage deviation is -12.75% with a PV system capacity of 100 kW and a consumer capacity of 2000 kW. The maximum THD is 4.209%, which is achieved when both the PV power and the consumer power are 2000 kW. Therefore, photovoltaic power generation projects cannot be connected to the grid system without restrictions.

After analyzing the simulation data, it can be obtained: It is necessary to consider the ability of the grid to absorb photovoltaic energy and the total load. Avoid the problem that the power quality of the system cannot meet the power consumption standards after connecting the photovoltaic grid.

REFERENCES

- [1] V. S. Arutyunov and G. V. Lisichkin, "Energy resources of the 21st century: problems and forecasts. Can renewable energy sources replace fossil fuels?" *Uspekhi Khimii*, vol. 86(8), pp. 777–804, 2017.
- [2] S. K. Sheryazov, K. M. Tynyshbaeva, Zh. T. Temirbaev, and A. S. Chigak, "Modeling the operating parameters of solar cells," *Engineering Sciences and Technologies*, vol. 4, pp. 34–43, 2023.
- [3] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier, and J. Wirth, "Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 95, pp. 1638–1646, 2011.
- [4] W. Xing, Research on maximum power point tracking control algorithm for photovoltaic power supply system. Shihezi, Shihezi University, 2017.
- [5] T. Sutikno, A. C. Subrata, G. Pau, A. Juson, and K. Ishaque, "Maximum power point tracking techniques for low-cost solar photovoltaic applications, Part I: constant parameters and trial-and-error," *Archives Of Electrical Engineering*, vol. 72(1), pp. 125 – 145, 2023.
- [6] S. A. Popov and V. I. Krivchenkov, "Methods for determining the maximum power point of a photovoltaic module," *Electronic Online Polythematic Journal "Scientific Works of Kubstu,"* vol. 4, pp. 146–154, 2021.
- [7] J. Ko, J. Huh, and J. Kim, "Overview of maximum power point tracking methods for PV system in micro grid," *Electronic Solutions for Artificial Intelligence Healthcare*, vol. 9(5), pp. 816 – 838, 2020.
- [8] J. Cheng, S. Wu, and W. Zuo, "Two-stage photovoltaic grid-connected inverter system using BOOST," *High Voltage Technology*, vol. 8(35), pp. 6–9, 2019.
- [9] A. A. Cherdintsev, A. V. Shchagin and S. A. Lupin, "Modified predictive control system for a step-up DC-DC converter," *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electronics*, Vol. 26(6), pp. 533–546, 2021.
- [10] B. Lang, H. Zhang, L. Sun, B. Wang, and X. Zheng, "Design of three phase grid-connected inverter based on grid-voltage oriented control," 2019 Chinese Control Conference (CCC), Guangzhou, China, 2019, pp. 6525–6530.
- [11] K. M. Pisolkar, V. Kore, V. Joshi, and A. Bhurke, "Solar PV grid connected system using Phase Lock Loop Synchronization and SPWM technique," 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kannur, India, 2019, pp. 846–849.
- [12] L. Collins and J. K. Ward, "Real and reactive power control of distributed PV inverters for overvoltage prevention and increased renewable generation hosting capacity," *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 464–471, 2015.
- [13] GOST 32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems.
- [14] GB/T 33592 -2017. Distributed power grid-connected operation control specifications.
- [15] GB/T 33593 - 2017. Technical requirements for network connection of distributed power supplies.

3) A. Vasileva, A. Vaskov and P. Shurkalov, "Mathematical Modeling of Operating Modes of the Diesel Power Plant," 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 171-176, doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028236. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11028236>.

2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)

Mathematical Modeling of Operating Modes of the Diesel Power Plant

Anastasiia Vasileva
Department of Hydropower and Renewable
Energy Sources
National Research University «Moscow
Power Engineering Institute»
Moscow, Russian Federation
VasilyevaAAI@mpei.ru

Aleksey Vaskov
Department of Hydropower and Renewable
Energy Sources
National Research University «Moscow
Power Engineering Institute»
Moscow, Russian Federation
VaskovAG@mpei.ru

Petr Shurkalov
Department of Hydropower and Renewable
Energy Sources
National Research University «Moscow
Power Engineering Institute»
Moscow, Russian Federation
ShurkalovPS@mpei.ru

Abstract—Improvement of energy and economic efficiency of power supply in isolated territories is provided in several ways: by replacement of diesel generator sets (DGS) with new ones, by creating a solar-diesel power complex, by implementing an energy storage system. In all these cases, an additional positive effect can be obtained by providing an optimal operation mode of the diesel power plant. However, for this purpose it is necessary to have an idea about possible methods of mathematical modeling of DGSs. The article describes the existing methods of mathematical modeling of diesel generators, their analysis and comparison with the results of measuring the main parameters characterizing the operating modes of real equipment. On the basis of the latter a conclusion is made about the most accurate method of mathematical modeling of diesel generators.

Keywords—diesel power plant, diesel generator set mathematical modeling, specific fuel consumption

I. INTRODUCTION

In Russia, the problem of power supply in distant locations that are not connected to the unified energy system is acute. According to [1], isolated generation facilities exist in 23 regions of the country. Most often diesel power plants (DPP) are used as the main source of energy in isolated power systems.

A typical DPP has a capacity that not exceeds 1,000 kW and includes several diesel generator sets. Figures 1 and 2 show the frequency of use of DPPs of different installed capacity and the specific volume of energy produced by them. The minimum capacity of a DPP is 5 kW (Inarigda site, Irkutsk region), and the maximum capacity is 16,325 kW (Turukhansk village, Krasnoyarsk region). The most frequently used are the DPPs with installed capacity from 100 to 250 kW (17 % of the total number) and from 250 to 500 kW (15 % of the total number). In general, larger DPPs with installed capacity of 4,000 kW and above together account for about 10 % of all generating facilities in the isolated and hard-to-reach areas.

The following conclusions can be made from the data presented:

- The largest number of DPPs is concentrated in Yakutia and Krasnoyarsk region, so these territories are of particular interest.

The research was carried out within the framework of the project "Development of theoretical foundations for designing hybrid energy storage systems for automated hybrid energy complexes" supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № FSWF-2025-0003.

979-8-3315-1219-4/25/\$31.00 ©2025 IEEE

- Most often "medium" DPPs are used (capacity from 100 to 500 kW, which is 32 % of the total number of power plants), and about 72 % of all installed DPPs have a capacity of less than 1,000 kW.
- Installed capacity and energy produced per person varies greatly by region and averages 2.65 kW/person and 3.02 thousand kW·h/(year·person).

A common operational problem with all DPPs is high fuel consumption, which results in increased operating costs. There are several ways to reduce the use of expensive fuel. For example, it is possible to replace outdated equipment of the existing power plant with more modern equipment. Energy saving can also play an important role.

In addition, the construction of hybrid power plants, where auxiliary generating equipment (wind or solar power plants) is added to the main generating equipment of a diesel power plant. Power plants based on renewable energy sources allow to switch off diesel generators more often or partially unload them, which gives a gain in absolute diesel fuel consumption. However, the specific consumption of diesel fuel may increase due to this because the equipment will operate less efficiently.

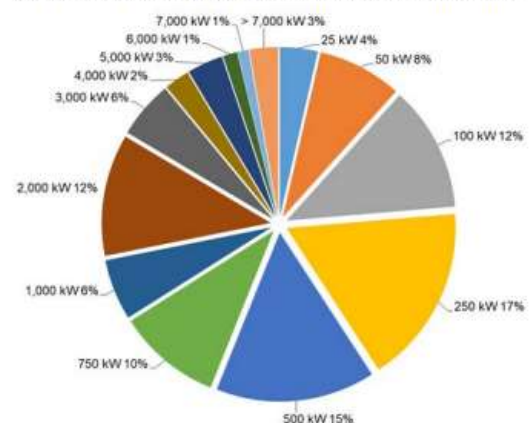


Fig. 1. Frequency of DPPs of different capacities usage in isolated power systems of Russia.

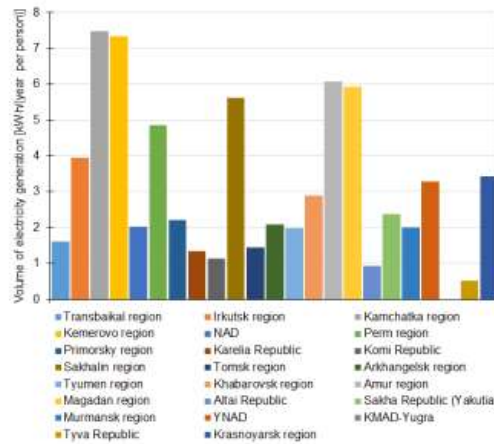


Fig. 2. Volume of electricity generation by DPPs in isolated power systems of Russia per person.

Thus, the value of specific fuel consumption of a diesel power plant is largely determined by the distribution of power between the diesel units included in the operation, the optimal version of which can be determined by the results of mathematical modeling of the operation modes of such power units.

II. MATHEMATICAL MODELING OF DGS

Nowadays, there are different models that are used for mathematical modeling of diesel generator sets. Out of their total number, 2 types of mathematical modeling can be distinguished:

- element-by-element modeling of DGS;
- modeling of DGS by calculating the fuel consumption value.

A. Element-by-element modeling of DGS

In fact, a DGS consists of three main elements that provide power generation. Figure 3 shows the main elements of the DGS, namely the diesel engine, synchronous generator and excitation system [2].

1) Diesel engine model.

A diesel engine (DE) model characterizes the dependence of fuel consumption on speed and mechanical power at the engine shaft. Typically, the DE is represented by a simple first-order model [3].

Mathematical modeling of diesel engine is given attention in a large number of literature sources, among which we can highlight [2–10]. Figure 4 shows a typical block diagram of the DE model according to [2], which can be used in the mathematical modeling of a DGS.

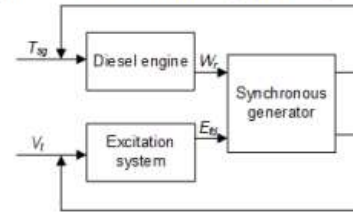


Fig. 3. Structural and functional block diagram of a diesel generator set: E_d – excitation voltage; T_m – motor torque; V_t – terminal voltage; W_m – motor shaft speed.

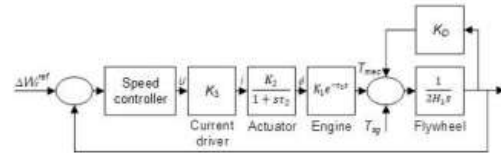


Fig. 4. Typical structural and functional block diagram of a diesel engine model: K_1 – motor torque constant; K_2 – actuator torque constant; K_3 – current driver constant; τ_1 – engine start delay time; τ_2 – drive time constant; s – motor time delay; H_1 – inertia constant; K_D – damping factor; ϕ – fuel flow; T_{mec} – mechanical torque.

Quite often the DE model includes a frequency controller that guarantees constant speed of rotation of the internal combustion engine shaft. The speed control is achieved by changing the amount of fuel consumed by the engine by means of an actuator, which can be a mechanical or electromechanical device. The actuator controls the engine speed by relating fuel consumption and speed. It should be remembered that the engine converts the fuel flow into mechanical torque with some time delay [2].

2) Synchronous generator model.

A mathematical model of an electrical machine is a system of equations describing the processes of electromechanical energy conversion with assumptions that provide the necessary accuracy for solving a particular problem. The system of equations for modeling a synchronous generator is obtained from Park's equations after some simplifications. The most important of which is the neglect of transients in the stator, since they occur much faster in the stator than in the rotor [4].

As an example of mathematical modeling of a synchronous generator the article [4] can be cited, where the rotor of a synchronous machine consists of three windings. On the direct axis, the excitation winding and the damping winding are considered, which makes it possible to take into account, respectively, transient and sub-transient processes on this axis. On the quadrature axis, the damping winding, which has a sub-transient (or transient) time constant, is considered. Using the model presented in [4], both sub-transient and transient phenomena can be investigated.

3) Excitation system model.

The excitation system has a great influence on the dynamic characteristics and functionality of the DGS. The main function

of the excitation system is to ensure the current flow in the rotor, which leads to an alternating current in the stator, with the possibility of short-term overload and control the voltage at the terminals with the necessary accuracy. The block diagram of the excitation control system is shown in the figure 5 below [2].

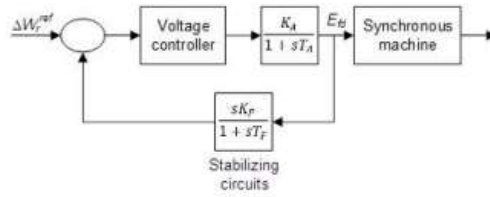


Fig. 5. Structural and functional block diagram of DGS excitation system.

The excitation system includes a voltage regulator whose task is to provide the DGS with the necessary excitation voltage to maintain the required voltage and reactive power produced by the generator [4].

As an example of mathematical modeling of the DGS excitation system, we can also refer to [4], where this system is modeled using differential equations written in matrix form.

In general, summarizing the results on the element-by-element type of mathematical modeling of DGS, it can be noted that such modeling is mainly used to analyze the transient processes occurring in the power system with diesel generator sets. Such a detailed mathematical modeling is rarely used to evaluate the optimal power distribution between several DGSs.

B. Modeling of DGS by calculating the fuel consumption value

In some literature ([11–13]) the modeling of DGS is done in a much simpler way than the one described in the previous paragraph, namely by calculating the amount of fuel consumed by the DGS.

The fuel consumption of a diesel generator depends on the rated power of the generator and the actual output power delivered by the generator. Using the fuel consumption curve provided by the diesel generator manufacturer is an accurate way to determine the fuel consumption at any load of the diesel generator. However, quite often in the passport characteristics of diesel generators, manufacturers only specify the fuel consumption at rated output and do not include the fuel consumption curve itself. This is especially true for small capacity generators [11].

To solve this problem, there are several ways to calculate the fuel consumption of a diesel generator:

- calculation using empirical coefficients;
- calculation in accordance with the methodology approved by the Ministry of Energy of the Russian Federation [14];

- calculation in accordance with the methodology of Lonmadi JSC [15].

1) Calculation using empirical coefficients.

According to [11], the equation (1) can be used to calculate the fuel consumption of a DGS in l/h:

$$FC_G = A_G + P_G + B_G \cdot P_{R-G} \quad (1)$$

where P_G , P_{R-G} – respectively output and rated power of DGS [kW]; A_G , B_G – coefficients calculated from the fuel consumption curve [l/kW·h].

Quite often, the values of these coefficients are taken as follows: $A_G = 0,246$ l/(kW·h) and $B_G = 0,08145$ l/(kW·h) [11]. According to [16], the results of calculating the fuel consumption of diesel generator sets according to these values are in good agreement with the values of fuel consumption at rated power of diesel generator sets provided by manufacturers of diesel generators.

To recalculate the fuel consumption calculated according to (1) into specific consumption of reference fuel [g.s.f./(kW·h)] it is possible to use (2):

$$b_{s.f.} = 1,45 \cdot \frac{FC_G \cdot \rho}{P_G} \quad (2)$$

where $\rho = 860$ kg/m³ – diesel fuel density; 1.45 – conversion factor of diesel fuel into fuel equivalent.

2) Calculation method approved by the Ministry of Energy of the Russian Federation.

According to [14], in the absence of test results of diesel generators or passport data of plants, it is allowed to accept the change in fuel consumption during operation in non-nominal operating modes by introducing the mode coefficient.

Calculation of the mode coefficient for each DGS can be made by (3):

$$K_{mode i} = 0,9 + \frac{0,1}{N_{Gi} / N_{rated i}}, \quad (3)$$

Where N_{Gi} – average projected load of the i -th diesel generator for the corresponding period [kW]; $N_{rated i}$ – nameplate capacity of the i -th DGS [kW].

In this case, the specific consumption of fuel equivalent [g.s.f./(kW·h)] will be calculated by (4):

$$b_i^{DGS} = b_{rated i}^{DGS} \cdot K_{mode i} \cdot \frac{Q_e^n}{7000}, \quad (4)$$

where $Q_e^n = 10,180$ kcal/kg – heat of combustion of fuel.

Fuel consumption indicator of the DGS according to the passport (in technical specifications) $[g/(kW \cdot h)]$ is calculated according to (5):

$$b_{rated}^{DGS} = \frac{b_{rated}^a}{\eta_{rated}^g}, \quad (5)$$

where b_{rated}^a – diesel generator fuel consumption rate $[g/(kW \cdot h)]$; η_{rated}^g – DGS efficiency.

3) Calculation method of Lonmadi JSC.

Calculation of fuel consumption according to this methodology involves the use of coefficients that take into account the load on the diesel generator and the degree of its wear and tear [15].

Fuel consumption can be determined by (6) or (8):

$$b_i^{DGS} = \frac{g_{rated} \cdot H \cdot C \cdot 1.36}{\eta_g} + \frac{B_i}{E}, \quad (6)$$

where g_{rated} – specific fuel consumption at rated power of 75 % (according to DGS passport) $[g/(kW \cdot h)]$; H, C – coefficients that take into account the load and engine wear, respectively (see table 1); η_g – generator efficiency depending on the operating mode; E – planned electricity generation $[kW \cdot h]$.

Fuel consumption at idling operation is calculated according to (7):

$$B_i = 0.15 \cdot N_{rated} \cdot g_{rated} \cdot K_i \cdot C \cdot n, \quad (7)$$

where N_{rated} – rated power of the generator $[hp]$; $K_i = 0.21$ – idle flow coefficient for DGS with power less than 1000 $[hp]$; n – planned number of engine starts.

$$b_i^{DGS} = \frac{1.05 \cdot K \cdot g_{rated}}{\eta_g} + \frac{1.05 \cdot K_i \cdot g_{rated} \cdot N_{rated} \cdot 0.15}{E}, \quad (8)$$

where K – coefficient, which takes into account the increase in flow rate due to load fluctuations and is calculated by (9):

$$K = 0.87 + 0.13 \cdot \frac{N_{rated}}{N_{av}}, \quad (9)$$

where N_{av} – average DGS power $[hp]$.

As it was mentioned above, a common problem of operation of all diesel power plants is high fuel consumption. Since the dependence of fuel consumption on generator power is rarely given in the passport characteristics of DGSs, the first task of the study was to select the most appropriate method for calculating the fuel consumption of a DGS at a particular capacity. The choice was made among the most common

methods discussed in this paragraph, and the results that these methods provide were tested using the experimental energy complex available to the authors, the description of which is given below.

TABLE I. VALUES OF COEFFICIENTS THAT TAKE INTO ACCOUNT THE LOAD ON THE DIESEL GENERATOR AND THE DEGREE OF ITS WEAR AND TEAR

Load in relation to rated power [%]	Coefficient H	Coefficient C
100	1.00	1.015-1.020
95	1.025-1.035	1.020-1.030
90	1.030-1.040	1.030-1.035
85	1.040-1.055	1.030-1.040
80	1.050-1.055	1.035-1.045
75	1.050-1.065	1.035-1.050
70	1.055-1.060	1.040-1.050
65	1.060-1.075	1.040-1.050
60	1.070-1.080	1.050-1.060
50	1.085-1.090	1.050-1.070
40	1.115-1.125	1.060-1.080

III. DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL ENERGY COMPLEX

The experimental energy complex is a diesel power plant equipped with two diesel power units based on a 36.9 kW Perkins 1103A-33T engine with a LSA 42.3-S5-J6/4m Leroy Somer 40 kW synchronous generator (see figure 6, left). The diesel units operate on a controlled electrical load, which is a set of heat-electric heaters. The load power can be varied from 0.2 to 51.2 kW.



Fig. 6. Experimental energy complex equipment: diesel generators (left) and fuel flow meter (right).

The measuring part of the energy complex is represented by Eurosens Delta RS 100 flow meters installed on each DGS (see figure 6, right). The main technical characteristics of the flow meters are presented in the table 2.

TABLE II. TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE EUROSSENS DELTA RS 100 FLOW METERS

Q_{min} [l/h]	$Q_{nominal}$ [l/h]	Q_{max} [l/h]	Measurement error [%]
1	50	100	± 1

Since in the passport characteristics of DGS of the energy complex there were no dependences of fuel consumption on power, the necessary information was obtained experimentally using the available measuring equipment. In the process of “capturing” the dependencies, diesel generators were loaded three times in the range from 22 to 95 % of rated capacity, and the results obtained were finally averaged. The corresponding graphs are presented in the figure 7.

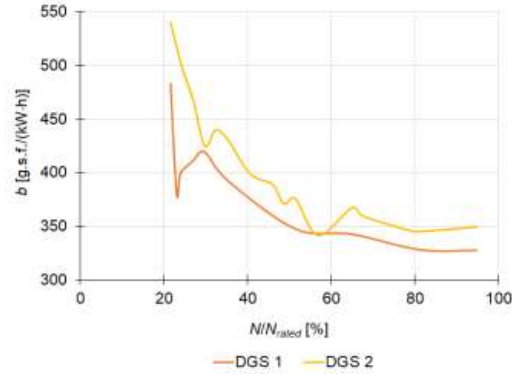


Fig. 7. Dependences of specific fuel consumption on the power of diesel units.

Based on the results obtained (see figure 7), it was concluded that the characteristics of specific fuel consumption can differ in the same power and operating conditions of DGSs. According to the results of the experiment, they differ by 11.78 % on average.

Thus, it is shown that the same models of diesel units have different characteristics and to improve the efficiency of the diesel power plant operation mode it is necessary to use an algorithm for determining the optimal uneven loading of the units.

IV. SELECTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF ADGS

In II some of the existing methods of calculation of specific fuel consumption depending on the load of a diesel generator were considered. In order to select the most suitable one, the corresponding calculations were made, the results of which are graphically presented in figure 8.

The following values of some coefficients were used in the calculations:

- Specific fuel consumption at rated power of the DGS: $b^{\text{rated}} = 216 \text{ g/(kW·h)}$.
- Specific fuel consumption at 75% of rated power: $g_{\text{rated}} = 220 \text{ g/(kW·h)}$.
- Efficiency: $\eta_{\text{rated}}^{\text{e}} = 90.5 \%$.

For a more accurate choice of the optimal calculation method the obtained calculated dependences of the change in specific fuel consumption were compared with the measured

dependences of real DGSs (see III), for which were calculated the values of relative error according to (10). The calculation results are given in the tables 3 and 4.

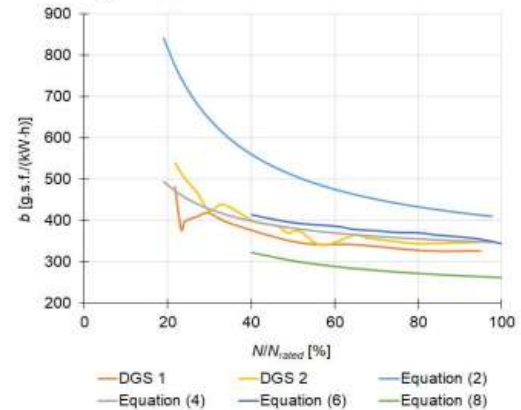


Fig. 8. Measured and calculated dependences of change in specific fuel consumption.

$$\delta = \frac{|A - X|}{X} \quad (10)$$

where A – calculated value [g.s.f./(kW·h)]; X – measured value [g.s.f./(kW·h)].

TABLE III. VALUES OF RELATIVE ERROR BETWEEN CALCULATED AND MEASURED DEPENDENCIES OF SPECIFIC FUEL CONSUMPTION CHANGE FOR DGS 1

Relative power [%]	Eq. (2)	Eq. (4)	Eq. (6)	Eq. (8)
21.68	60.4	2.2	-	-
24.39	80	13.2	-	-
27.10	65.6	7	-	-
29.81	54.4	2.2	-	-
35.23	51.3	4.5	5.5	17.8
51.49	44.9	9.2	13.8	12.9
65.04	35	6.7	10.6	17.1
81.30	31.5	8.1	13	17
94.85	26.3	6.5	8.5	19.3
Average	49.9	6.6	10.3	16.8

As can be seen from tables 3 and 4, the most accurate is the 2nd method (equation (4)) of calculating specific fuel consumption at DGS capacity other than nominal. It can also be used to obtain the initial data required to optimize the composition of the power units included in the power plant operation.

TABLE IV. VALUES OF RELATIVE ERROR BETWEEN CALCULATED AND MEASURED DEPENDENCIES OF SPECIFIC FUEL CONSUMPTION CHANGE FOR DGS 2

Relative power [%]	Eq. (2)	Eq. (4)	Eq. (6)	Eq. (8)
21.68	43.5	12.6	-	-
24.39	45	8.8	-	-
27.10	45.7	5.8	-	-
29.81	52.3	0.9	-	-
35.23	37.9	4.8	8.3	25.1
51.49	34.1	1.1	5.4	19.4
65.04	26.1	0.4	3.3	22.6
81.30	25.1	2.9	7.6	21
94.85	18.5	0.05	1.8	24.2
Average	36.5	4.1	5.3	22.4

V. CONCLUSION

The study investigated the optimization of diesel power plant operation in isolated power systems by analyzing mathematical modeling methods for diesel generator sets and their fuel consumption characteristics. The research confirmed that efficient operation of diesel power plants is critical for reducing operational costs in remote areas of Russia, where such facilities remain the primary energy source.

Two main approaches to DGS modeling were explored: element-by-element modeling and fuel consumption-based modeling. While the former provides detailed insights into transient processes, it is less practical for optimizing power distribution. The latter, based on calculating specific fuel consumption, proved more suitable for this purpose. Three specific methods were evaluated against experimental data from a diesel power plant. The results demonstrated that the Ministry of Energy's method offers the highest accuracy. This method effectively accounts for non-nominal operating modes, making it a reliable tool for determining optimal DGS loading.

The experimental findings also revealed a significant variation (up to 11.78%) in specific fuel consumption between identical DGS units under the same conditions, highlighting the need for individualized load optimization strategies.

For practical application, the selected modeling method can be integrated into control algorithms for DPP operation, enabling real-time optimization of power distribution. Further research will focus on combining this approach with renewable energy sources or energy storage systems to maximize fuel savings. These advancements could significantly improve the sustainability and reliability of power supply in Russia's remote territories, addressing both economic and environmental challenges.

REFERENCES

- [1] Analytical Center under the Government of the Russian Federation. Generation facilities in isolated and hard-to-reach areas in Russia: Analytical report. (in Russian)
- [2] I. Yahyaoui, *Advances in renewable energies and power technologies. Volume 1: Solar and Wind Energies*, Elsevier, Spain, 2018.
- [3] S. Roy, O. P. Malik, and G. S. Hope, "An adaptive control scheme for speed control of diesel driven power-plants," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, vol. 6, no. 4, pp. 605-611. DOI: 10.1109/60.103632
- [4] G. S. Stavrakakis, G. N. Kariniotakis, "A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines systems interaction," *I. A general multimachine power system model*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 3, pp. 577-583, 1995. DOI: 10.1109/60.464885
- [5] G. N. Kariniotakis, G. S. Stavrakakis, "A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines systems interaction," Part II: Implementation of the algorithm and case-studies with induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 3, pp. 584-590, 1995. DOI: 10.1109/60.464886
- [6] S. Roy, O. P. Malik, and G. S. Hope, "A least-squares based model-fitting identification technique for diesel prime-movers with unknown dead-time," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, no. 2, pp. 251-256, 1991. DOI: 10.1109/60.79629
- [7] Bo Kuang, Youyi Wang, and Yoke Lin Tan, "An H/sub /spl infin// controller design for diesel engine systems," *PowerCon 2000, 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, Perth, WA, Australia, 2000, pp. 61-66 vol.1, doi: 10.1109/ICPST.2000.900032.
- [8] P. B. Malatestas, M. P. Papadopoulos, and G. S. Stavrakakis, "Modeling and identification of diesel-wind turbines systems for wind penetration assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 1091-1097, 1993. DOI: 10.1109/59.260889
- [9] J. Salazar, F. Tadeo, and C. de Prada, "A microgrid library in a general simulation language," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 3599-3604, 2019. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00189
- [10] Y. Zoka, H. Sasaki, N. Yorino, K. Kawahara, and C. C. Liu, "An interaction problem of distributed generators installed in a microgrid," *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings*, vol. 2, pp. 795-799, 2004. DOI: 10.1109/DRPT.2004.1338091
- [11] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. M. I. Mahlia, "Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate," *Energy Conversion and Management*, vol. 69, pp. 163-173, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.02.005
- [12] C. Srinivasarathnam, C. Yammani, and S. Maheswarapu, "Load frequency control of multi-microgrid system considering renewable energy sources using grey wolf optimization," *Smart Science*, vol. 7, no. 3, pp. 198-217, 2019. DOI: 10.1080/23080477.2019.1630057
- [13] R. Dufo-Lopez, and J. L. Bernal-Agustin, "Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 2559-2572, 2008. DOI: 10.1016/j.renene.2008.02.027
- [14] Order No. 323 of December 30, 2008 "On approval of the procedure for determination of specific fuel consumption standards for electricity and heat generation," [Online]. Available: <https://docs.cntd.ru/document/902148460>, accessed on 2023-04-10
- [15] R. Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin, J. M. Yusta-Loyo, J. A. Dominguez-Navarro, I. J. Ramirez-Rosado, J. Lujano, and I. Aso, "Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage," *Applied Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4033-4041, 2011. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.04.019