

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Автоматизированных электроэнергетических систем

(полное название кафедры)

Утверждаю

Зав. кафедрой В.М. Левин

(инициалы, фамилия)

(подпись)

«_____» _____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

по направлению высшего образования

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки магистра)

Энергетики

(факультет)

Гладков Дмитрий Сергеевич

(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

Разработка модели накопителя энергии в составе автономной энергосистемы

(полное название темы магистерской диссертации)

**Руководитель
от НГТУ**

Зырянов Вячеслав Михайлович

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., с.н.с.

(ученая степень, ученое звание)

(дата, подпись)

**Автор выпускной
квалификационной работы**

Гладков Дмитрий Сергеевич

(фамилия, имя, отчество)

ФЭН, ЭНМ2-91

(факультет, группа)

(дата, подпись)

Консультанты по разделам:

Экономический раздел

(краткое наименование раздела)

Е.А. Гришина

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

Новосибирск 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Автоматизированных электроэнергетических систем
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Левин Владимир Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ
НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ**

студенту Гладкову Дмитрию Сергеевичу
(фамилия, имя, отчество)

факультета Энергетики
(полное название факультета)

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки магистра)

Магистерская программа Электроэнергетические системы и сети
(наименование магистерской программы)

Тема Разработка модели накопителя энергии в составе автономной энергосистемы
(полное название темы магистерской диссертации)

Цели работы Разработка математической модели в ППК MATLAB/Simulink автономной электростанции на базе дизельной и солнечной генерации, имеющей в своем составе гибридную систему накопления энергии, поддерживающую требуемый уровень частоты сети в автоматическом режиме.

Задание согласовано и принято к исполнению.

**Руководитель
от НГТУ**

Зырянов Вячеслав Михайлович

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., с.н.с.

(ученая степень, ученое звание)

(дата, подпись)

**Автор выпускной
квалификационной работы**

Гладков Дмитрий Сергеевич

(фамилия, имя, отчество)

ФЭН, ЭНМ2-91

(факультет, группа)

(дата, подпись)

Тема утверждена приказом НГТУ № 4772/2 от «22» октября 2019 г.
изменена приказом НГТУ № 339/2 от «8» февраля 2021 г.

Диссертация сдана в ГЭК № 107.1, тема сверена с данными приказа

(подпись секретаря государственной экзаменационной комиссии по защите ВКР, дата)

Мышкина Людмила Сергеевна

(фамилия, имя, отчество секретаря государственной экзаменационной комиссии по защите ВКР)

Консультанты по разделам:

Экономический раздел

(краткое наименование раздела)

Нормоконтроль

(краткое наименование раздела)

Е.А. Гришина

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

Л.С. Мышкина

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

АННОТАЦИЯ

По мере своего развития электроэнергетические системы становятся все более сложными не только по своей структуре, но и по функциональным возможностям. В их составе появляются принципиально новые элементы энергосистем, такие как системы накопления энергии (СНЭ), которые позволяют решать ряд сложных задач комплексно и гораздо более эффективно, чем это делается традиционными методами. Как и в случае с традиционными элементами энергосистем, для выбора параметров СНЭ, разработки и отработки алгоритмов управления, анализа целесообразности и эффективности применения СНЭ необходимы соответствующие математические, физические и другого рода модели, позволяющие производить расчёты установившихся режимов и переходных процессов. В работе изучены принципы построения математических и физических моделей СНЭ, области их применения. Представлены результаты экспериментов реальных СНЭ. Проведен сравнительный анализ результатов расчета на математической модели и натурных экспериментов. Разработан проект физической модели СНЭ для модернизации существующей электродинамической модели в НГТУ. Разработан алгоритм управления мощностью СНЭ для сглаживания резко переменной нагрузки и регулирования частоты в автономной энергосистеме, состоящей из дизель-генераторной установки, солнечной генерации и системы накопления энергии на базе суперконденсаторов и литий-ионных аккумуляторных батарей. Выполнена апробация алгоритма управления мощностью СНЭ на математической модели энергосистемы.

ABSTRACT

In the process of development power systems are becoming more complex not only in structure, but also by functional capabilities. They include fundamentally new elements of the power system, such as energy storage systems (ESS). ESS can solve a number of complicated issues in a complex and a significantly more efficient than traditional methods. The application of ESS on objects of distributed power systems, especially in off-grid power systems, nowadays is one of the most profitable application of ESS in Russian electric power industry. Similarly, to the traditional elements of power systems, for the choosing of ESS parameters, for the development and testing of control algorithms, for the analysis of the feasibility and effectiveness of ESS application, the relevant mathematical, physical and other models are required to perform calculations of steady regimes and transient processes. The paper gives the principles of constructing mathematical and physical models of ESS, their areas of application. The results of full-scale experiments on the industrial prototype of ESS and calculations performed using the mathematical model of ESS proved their qualitative and quantitative coincidence sufficient for scientific and engineering studies of ESS operation in electric power industry. The project of a physical model of ESS was developed for the modernization of the existing electrodynamic model at NSTU. An algorithm for controlling the power of ESS has been developed to smooth out an abruptly variable load and regulate the frequency in an autonomous power plant consisting of a diesel generator set, solar generation and an energy storage system based on lithium-ion batteries and supercapacitors. Approbation of the power control algorithm of ESS on the mathematical model of the power system has been carried out.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ.	10
1.1 Основные типы накопителей энергии	10
1.2 Области применения накопителей энергии в энергосистемах.....	23
1.3 Мировой и отечественный опыт применения накопителей энергии	27
2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	30
2.1 Натурные эксперименты	30
2.2 Физическое моделирование (электродинамические модели)	31
2.3 Математическое моделирование	35
2.4 Цифровое моделирование в реальном времени.....	35
3 НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГОЛОВНОГО ЭКЗЕМПЛЯРА СЕРИЙНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ СНЭ-10-1200-400 В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ	38
3.1 Описание экспериментальной установки.....	39
3.2 Программа испытаний.....	43
4 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭДМ НГТУ.....	50
4.1 Назначение и описание электродинамической модели НГТУ.....	50
4.2 Технические требования и структура модели СНЭ в составе ЭДМ НГТУ.....	58
5 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЭ	60
5.1 Описание математической модели СНЭ	61
5.2 Верификация математической модели СНЭ по результатам натурного эксперимента	62
6 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНЭ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ДГУ И ВИЭ	70

6.1 Разработка алгоритма управления СНЭ для регулирования частоты в автономной энергосистеме	74
6.2 Примеры расчета переходных процессов в автономной энергосистеме с возобновляемыми источниками энергии.....	82
7 ОЦЕНКА КОММЕРЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ЗА СЧЕТ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ.....	84
7.1 Оценка стоимости установки и эксплуатационных затрат.....	87
7.2 Оценка доходов после оптимизации состава генерирующего оборудования.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	94

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия использование СНЭ в электроэнергетических системах стало одним из ключевых направлений развития энергетики [1-4]. Активное внедрение и использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) во всем мире [5] послужило главным драйвером для развития СНЭ [6]. ВИЭ отличаются непостоянством выработки электроэнергии, поэтому СНЭ – необходимое звено, позволяющее с помощью управления потоками мощности согласовать неравномерность генерации и потребления электроэнергии [7].

Одна из задач, стоящих перед СНЭ в автономных энергосистемах – регулирование частоты напряжения [8]. Для автономных энергосистем характерны интенсивные и относительно глубокие колебания мощности нагрузки, которые формируют потребность в быстродействующем резерве мощности [9,10,11]. Современные СНЭ за счет своего быстродействия и многофункциональности позволяют эффективно заменять традиционные резервы мощности. При этом актуальными остаются вопросы согласования традиционных средств регулирования частоты с алгоритмами управления СНЭ.

В связи с этим целесообразно: разработка алгоритма управления системой накопления электрической энергии (СНЭ), позволяющей использовать её в качестве устройства, поддерживающего требуемый уровень частоты в автономной энергосистеме в автоматическом режиме.

Данная работа соответствует задачам Минэнерго, изложенным в концепции развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации [12].

Цель работы:

Разработка математической модели в ППК MATLAB/Simulink автономной электростанции на базе дизельной и солнечной генерации, имеющей в своем составе гибридную систему накопления энергии,

поддерживающую требуемый уровень частоты сети в автоматическом режиме.

Для достижения поставленной цели в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих проблем регулирования частоты сети, возникающих в автономных энергосистемах с резко переменной нагрузкой, и способов их решения.
2. Оценить влияние качества регулирования частоты сети на режим работы различных источников электроэнергии (ДГУ, ГПУ, солнечной электростанции (СЭС)) и электроприемников автономных энергосистем.
3. Разработать математическую модель автономной энергосистемы с гибридной СНЭ в ППК MATLAB/Simulink.
4. Верифицировать модель ДГУ путем сравнения расчетов с натурными испытаниями.
5. Верифицировать модель СНЭ путем сравнения расчетов с натурными испытаниями.
6. Разработать алгоритмы управления СНЭ для регулирования частоты сети.
7. Рассчитать переходные процессы в автономной энергосистеме с использованием модели применение СНЭ для регулирования частоты сети при различных графиках нагрузки.
8. Провести сравнительный анализ показателей качества переходных процессов для примененных алгоритмов управления СНЭ, выбрать наиболее эффективный.

1 НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Системы накопления энергии в ближайшем будущем станут важнейшим элементом современных электроэнергетических систем. Существующие технологии накопления позволяют создавать СНЭ с широким диапазоном мощности и энергоемкости, с выдачей или потреблением длительностью от миллисекунд до часов и дней. Тем самым СНЭ могут выполнять множество функций и применяться в разных областях электроэнергетики. Такие качества СНЭ, как быстроедействие и многофункциональность, позволяют реализовывать принципиально новые архитектуры энергосистем [13]. Принципы работы и возможности различных типов накопителей рассматриваются ниже.

1.1 Основные типы накопителей энергии

Накопитель электрической энергии (НЭЭ) - устройство, способное поглощать электрическую энергию, хранить ее в течение определенного времени и отдавать электрическую энергию обратно, в ходе чего могут происходить процессы преобразования энергии [14].

Энергия в НЭЭ может храниться в разных формах. Основные типы систем накопления по форме запасаемой энергии в НЭЭ представлены на рисунке 1.1.

Накопители энергии прошли долгий путь, чтобы оказаться в том виде, в котором они находятся сегодня. До XIX века накопители энергии не были распространены, люди сознательно не хранили энергию. Тепловые батареи – это первый тип накопителей энергии, который человек использовал сознательно. Чтобы представить постепенный прогресс технологий накопления, рассмотрим эволюцию СНЭ в таблице 1.1 [15].



Рисунок 1.1 – Основные типы систем накопления энергии

В зависимости от решаемых задач с помощью СНЭ выбирается конкретный тип НЭЭ. Когда возникает необходимость включить в СНЭ более одного типа НЭЭ, то применяют гибридную СНЭ.

Таблица 1.1– Эволюция технологий накопления энергии в хронологическом порядке.

Год	Вид накопителя	Краткая история открытия
Древнейший	Биотопливо	Биотопливо используется с древних времен в виде древесины и других видов твердой биомассы.
1800	Гальванический элемент	В 1786 году Луиджи Гальвани стал первооткрывателем гальванического тока. На основе этих наблюдений в 1800 году Алессандро Вольта изобрел первый гальванический элемент.
1839	Хром-цинковый элемент	Славу изобретателя элемента делят три знаменитых химика — Уильям Грове, Роберт Бунзен и Иоганн Поггендорф.
1859	Свинцово-кислотный аккумулятор	Свинцово-кислотная батарея, изобретенная в 1859 году французским физиком Гастоном Планте, является самым первым типом перезаряжаемых батарей.

Продолжение таблицы 1.1

Год	Вид накопителя	Краткая история открытия
1882	Гидронасосный накопитель	В 1882 году первая в мире гидроаккумулирующая электростанция начала работать в Швейцарии в окрестностях Цюриха.
1883	Маховик	Первый маховичный накопитель был сделан из стали. Он был разработан Джоном А. Хауэллом в 1883 году для военных целей.
1884	Проточный аккумулятор	Французский инженер Шарль Ренар изобрел проточные батареи в 1884 году для питания дирижабля с электрическим пропеллером.
1899	Ni-Cd батарея	Никель-кадмиевый аккумулятор был изобретен Вальдемаром Юнгнером в 1899 году. Дальнейшие усовершенствования произошли в 1947 году, что привело к созданию современной герметичной никель-кадмиевой батареи.
1899	Ni-Zn батарея	Никель-цинковые батареи были впервые изобретены в 1899 году. Их коммерческое производство началось в 1920 году.
1901	Ni-Fe батарея	Железо-никелевый аккумулятор был разработан Томасом Эдисоном в 1901 году и использовалась для электромобилей, таких как Detroit Electric и Baker Electric.
1960	Na-S батарея	Серно-натриевый аккумулятор был изобретен в Ford Motor Company в 1960 году для установки на электромобили ранних моделей.
1967	Никель металлгидридная батарея	Исследования никель-металл-гидридной батареи начались в 1967 году.
1968	Натриевые батареи	Также известны как батареи ZEBRA, металлические натриевые галогенидные батареи были впервые представлены в Южной Африке в 1968 году.
1969	СПИН	СПИН был впервые предложен как способ хранения энергии в 1969 году.
1970	Никель-водородный аккумулятор	Никель-водородная батарея была разработана лабораториями Comsat и Tyco при спонсорской поддержке Intelsat.
1978	Суперконденсатор	Исследования суперконденсаторов начались в 1957 году компанией General Electric. После многих этапов развития суперконденсатор появился на рынке в 1978 году.
1978	Накопитель сжатого воздуха	Первым проектом накопителя сжатого воздуха для коммунальных предприятий стала установка Huntorf мощностью 290 МВт в Германии с использованием соляного купола, реализация которой началась в 1978 году.
1980	Литий-ионный аккумулятор	В 1980 году американский физик профессор Джон Гуденоф изобрел литий-ионную батарею.
1980	Литий-полимерный аккумулятор	Изобретение литий-полимерной батареи произошло в 1980-х годах. Первый коммерческий литий-ионный аккумулятор был выпущен Sony в 1991 году.

Каждый из множества типов накопителей энергии, основывающихся на разных физических принципах, имеет свои преимущества и недостатки, у каждого из них есть своя область применения. Одни оптимальны в повышении технико-экономических показателей генерирующего оборудования электростанций, другие — на этапе передачи и распределения энергии, третьи — для крупных потребителей, четвертые — для конечных потребителей. В первую очередь, это связано с разным временем отклика и количеством жизненных циклов накопления-отдачи. Поэтому все типы накопителей условно можно разделить на две группы:

1. Накопители энергии с низкой скоростью отклика (ГАЭС, ВАЭС, ТАЭС, термические накопители и др.), которые используются для суточного или недельного регулирования.
2. Быстродействующие накопители энергии (литий-ионные аккумуляторные батареи, суперконденсаторы, сверхпроводниковые индуктивные накопители, маховичные накопители и др.), обладающие временем отклика не более 2–3 периодов промышленной частоты, что соизмеримо с продолжительностью электромеханических переходных процессов.

Ниже рассмотрены некоторые типы систем накопления энергии в электроэнергетике.

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) — гидроэлектростанция, используемая для выравнивания суточной неоднородности графика электрической нагрузки. Относительно других видов накопителей, имеет низкую маневренность (переход из одного режима в другой производится за 15 с и менее).

Первая ГАЭС развернута в 1882 году в Швейцарии. ГАЭС является одним из самых популярных методов хранения энергии благодаря своей простоте и большой энергоёмкости [16]. ГАЭС занимает первое место в мире по суммарной установленной мощности, что составляет 125 ГВт (96 % от мировой мощности всех накопителей) [17]. ГАЭС – зрелая и надежная технология с высокой эффективностью (76–85%), низкими капитальными

затратами на 1 МВт·ч, длительным периодом хранения, практически неограниченным жизненным циклом и длительным сроком службы 50 лет и более. ГАЭС используются в основном для длительных процессов, таких как выравнивания суточных графиков нагрузки. ГАЭС является адаптацией традиционной ГЭС. На обычной ГЭС вода хранится в водохранилище и выпускается на турбину для преобразования гравитационной потенциальной энергии воды в электрическую энергию. Здесь накопленная вода используется только один раз. Однако на ГАЭС имеются два водохранилища, один над другим, а также турбинно-насосный зал. Принципиальная схема ГАЭС представлена на рисунке 1.2. Как и на обычной ГЭС, вода из верхнего резервуара используется для выработки электроэнергии. Далее, вода хранится в нижнем резервуаре и перекачивается в верхний резервуар с помощью насосов в период низкой нагрузки. Затем вода снова сбрасывается в пиковый период, когда потребность в электроэнергии высока. Таким образом, воду можно использовать несколько раз, что делает ее более эффективной системой.

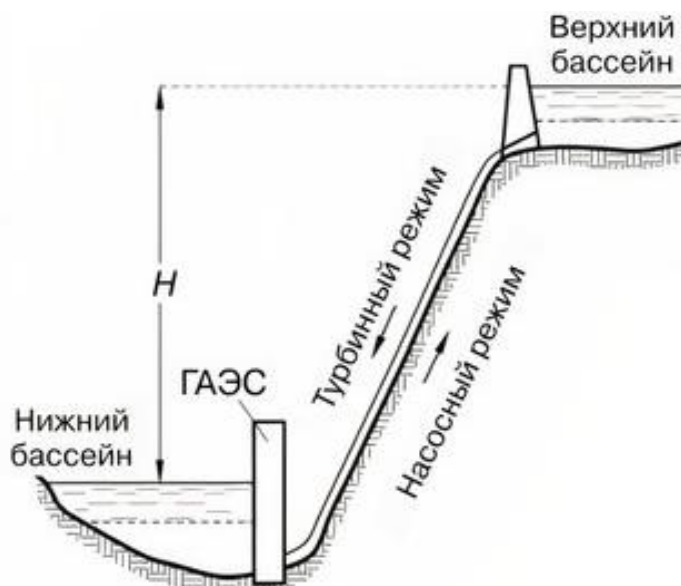


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема ГАЭС

Воздушно-аккумулирующие электростанции (ВАЭС) используют в качестве рабочего тела воздух.

В периоды минимума нагрузки воздух сжимается компрессором и закачивается в подземные хранилища. В период дневного максимума сжатый воздух извлекается путем расширения и подается в камеру сгорания турбоагрегата, где смешивается с топливом. Принципиальная схема ВАЭС представлена на рисунке 1.3.

ВАЭС имеют высокую мощность в диапазоне от 35 до 300 МВт, что делает их пригодными для выравнивания суточных графиков нагрузки и регулирования частоты.

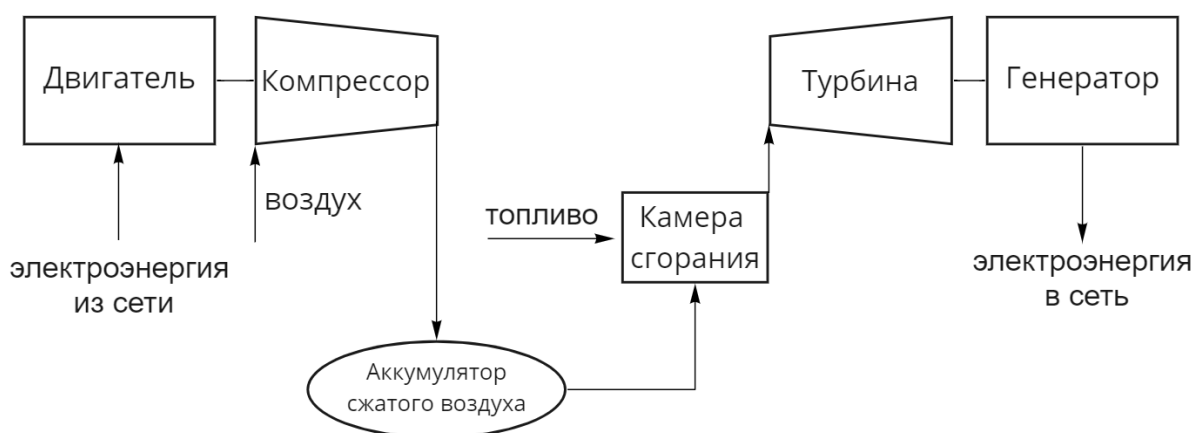


Рисунок 1.3 - Принципиальная схема воздушно-аккумулирующей электростанции.

Основным недостатком обычной ВАЭС является то, в процессе сжатия выделяется большое количество тепла, которое отводится через радиатор прямо в атмосферу. Кроме того, необходимая энергия генерируется за счет сжигания топлива, в результате чего выделяется большое количество CO_2 . Чтобы преодолеть эти проблемы была разработана адиабатическая ВАЭС, которая работает без топлива с КПД почти 70 %. Принципиальное отличие адиабатической ВАЭС от классической заключается в том, что тепло, выделяющееся на стадии расширения сохраняется в специальном

адиабатическом хранилище и повторно используется на стадии расширения воздуха.

Также все чаще применяются современные криогенные накопители, где рабочим телом является жидкий воздух, что приносит выгоду с точки зрения занимаемой площади и соответственно плотности запасаемой энергии.

Последним в списке воздушно-аккумулирующих электростанций выступает система аккумулирования энергии со сверхкритическим сжатием воздуха, в которой сочетаются преимущества как адиабатической, так и криогенной ВАЭС. Плотность запасаемой энергии такой системы в 18 раз выше, чем у обычной ВАЭС, а КПД составляет около 70%.

Сравнение различных типов воздушно-аккумулирующих электростанций представлено в таблице 1.2 [15].

Таблица 1.2 – Сравнения различных типов ВАЭС

Тип	Плотность энергии, Вт·ч/л	Мощность, МВт	Срок хранения	Ожидаемый срок эксплуатации, лет
ВАЭС	2-6	110-290	часы-месяцы	20-40
Адиабатическая ВАЭС	2-6	110-290	часы-месяцы	
ВАЭС с жидким воздухом	8-24	0,3-2,5	-	
ВАЭС с критическим сжатием воздуха	8-24	110-290	часы-месяцы	

Твердотельная аккумулирующая электростанция (ТАЭС) использует в своей работе комплекс лифтов, приводы которых могут работать в генераторном режиме при спуске груза, так и двигательном режиме при поднятии. В период низкого электропотребления ТАЭС может получать из сети дешёвую электроэнергию на подъем грузов. Во время пиков электропотребления грузы перемещаются вниз под действием силы тяжести,

и приводы лифтов в режиме электрических генераторов передают электроэнергию в сеть.

Преимуществами ТАЭС перед ГАЭС являются возможность их размещения в любом удобном месте, они занимают в пять раз меньшую площадь при равной мощности, безопасность конструкции [15].

Термические накопители запасают и выдают энергию за счет изменения температуры теплоносителя (например, солевого раствора). Термические накопители часто используются на СЭС башенного типа, в которых хранится тепловая энергия солнца.

Накопители данного типа имеют низкий уровень саморазряда (0,05–1%), достаточную плотность энергии (80–500 Вт·ч/л) и удельную мощность (80–250 Вт/кг) и низкие капитальные затраты. Минусом данной технологии накопления является низкий КПД цикла (от 30 до 60%). По диапазону рабочих температур термические накопители можно разделить на низкотемпературные и высокотемпературные [15].

Электрохимические накопители включают в себя все виды аккумуляторов, которые хранят электрическую энергию в форме химической энергии. В зависимости от состава батареи их можно разделить на разные типы: свинцово-кислотные, литий-ионные, никель-кадмиевые, полифосфатные, воздушно-цинковые и т. д.

Средние показатели удельной энергоёмкости у аккумуляторных батарей от 100 до 300 Вт·ч/кг, а КПД от 70 до 85% [15].

Благодаря ряду параметрических преимуществ наибольшую популярность в настоящее время приобрели литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ). Токи заряда и разряда ЛИАБ близки к друг другу, что является важным условием для активного реверсивного энергообмена. Конструкция литий-ионного аккумулятора представляет собой положительный и отрицательный электроды, погруженные в электролит. На обоих электродах проходят химические реакции, в результате которых происходит присоединение или освобождение электронов. ЛИАБ уже

заменили традиционные свинцово-кислотные и никель-кадмиевые аккумуляторы во многих областях. Предпосылками для их широкого внедрения являются следующие преимущества:

1. отсутствуют потери на преобразование энергии;
2. не содержат движущихся частей, не подвержены механическому износу, так как являются статическими устройствами;
3. высокий КПД;
4. срок службы до 20 лет;
5. эксплуатация в широком температурном диапазоне;
6. низкие эксплуатационные расходы;
7. высокая степень готовности к эксплуатации;
8. возможность быстрого восстановления заряда;
9. низкий процент саморазряда в месяц (около 1,5%);
10. достаточная плотность энергии (~ 250 Вт·ч/кг);
11. незначительный эффект памяти.

Основными сдерживающими факторами для применения ЛИАБ являлись их высокая стоимость и необходимость использования систем управления (BMS). За последнее время произошло существенное снижение их стоимости, что потенциально позволяет их эффективно использовать во многих отраслях энергетики [8].

Суперконденсаторы (СК) являются емкостными накопителями энергии, в которых энергия запасается и хранится на противоположных поверхностях электродов в виде энергии электрического поля. В целом СК представляют из себя гибридную химическую аккумуляторную батарею и обычный конденсатор. Суперконденсатор – элемент состоящий из двух электродов, электролита и сепаратора. За счет сепаратора расстояние между электродами гораздо меньше, что дает возможность накапливать большее количество энергии.

Двойной электрический слой осуществляет пространственное разделение зарядов противоположного знака в межфазном слое. Одна из фаз

представлена электролитом, а другая твердым телом. При приложении напряжения происходит движение анионов и катионов к соответствующим электродам. Накапливаясь на поверхности электродов, ионы образуют двойной электрический слой, составляющий всего несколько десятков нанометров.

Суперконденсаторы обладают большим запасом циклов заряда/разряда, высокой плотностью энергии и практически мгновенной скоростью заряда/разряда. Поэтому они чаще применяются для кратковременных сглаживаний нагрузки и не используются, как накопители для длительного хранения, где требуются большие площади диэлектрика [15]. Например, СК могут применяться для запуска двигателей козловых кранов и сглаживания пиковых нагрузок при поднятии грузов [18].

Сверхпроводниковые индуктивные накопители (СПИН) запасают энергию в магнитном поле индуктивной сверхпроводниковой катушки. Сверхпроводимость наступает при достижении критической температуры, при котором исчезает электрическое сопротивление материала.

СПИН обладает высоким КПД преобразования (больше 95 %) и быстродействием. СПИН не имеет ограничения по числу циклов заряд/разряд [15].

Маховичный накопитель конструктивно представляет собой маховик в сочетании с электрической машиной, которая может работать в генераторном или двигательном режиме. Кинетическая энергия вращения в двигательном режиме работы в маховике запасается кинетическая энергия вращения, в режиме генератора аккумулялированная энергия поступает в систему. Накопитель подключается к энергосистеме посредством преобразователя напряжения, что позволяет осуществлять обмен энергии.

По скорости вращения маховики можно разделить на высокоскоростные (10^4 – 10^5 об/мин) и низкоскоростные (менее 6000 об/мин). Высокоскоростные маховики из сверхпрочных композитных материалов

компактнее низкоскоростных, которые, свою очередь, изготавливаются из металла.

Маховичные накопители обладают высокой энергоёмкостью, КПД, удельной и установленной мощностью в диапазоне от кВт до ГВт. Накопители данного типа подходят для задач выравнивания пиков нагрузки и обеспечения бесперебойного питания [15].

Сравнительный обзор различных типов накопителей представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики накопителей энергии различных типов

Тип	Мощность	Время отклика	Продолжительность накопления и отдачи	КПД накопления -отдачи
Гравитационные: ГАЭС, ТАЭС	МВт, ГВт	Секунды, минуты	От часов до недель	70–85%
Термические: солевые	МВт	Минуты	Часы	80–90%
Химические: на водороде, метане, этаноле	МВт	Секунды, минуты	Часы	До 45%
Электрохимические: ЛИАБ и СК	Вт, МВт	Миллисекунды	Минуты, часы, дни	До 98%
Сверхпроводниковые: (СПИН)	Вт, кВт	Миллисекунды	Минуты, часы, дни	До 98%
Механические: маховики	Вт, кВт	Секунды	Секунды, минуты	До 98%

Из таблицы 1.3 следует, что быстродействующие накопители обладают высокой скоростью реагирования и способны участвовать в процессах регулирования частоты, напряжения, а также подавления нежелательных гармоник, в отличие от накопителей с большим временем отклика. Другими словами, современные быстродействующие и многофункциональные СНЭ позволяют решать многие актуальные задачи, которые не могут быть решены традиционными методами или решаются ими не эффективно.

Данные о сроке службы, области применения, преимуществах и недостатках отдельных типов накопителей представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнение различных накопителей энергии

Тип	Типичные сроки службы	Оптимальные участки использования	Плюсы	Минусы
Гравитационные: ГАЭС, ТАЭС	Десятилетия	Генерация, распределение	Дешевизна, техническая зрелость	Требовательность к строительному участку, малая плотность накопления, низкая скорость отклика
Термические: солевые	Десятилетия	Генерация	Простота, техническая зрелость, экономичность	Низкая скорость отклика
Химические: на водороде, метане, этаноле	Годы	Генерация, распределение	Дешевизна	Низкая плотность накопления, опасность возгорания
Электрохимические: ЛИАБ и СК	Годы, десятилетия	Генерация, распределение, потребление	Высокая плотность накопления, развитая технология	С течением времени происходит постепенная потеря емкости
Сверхпроводниковые: СПИН	Годы, десятилетия	Генерация, распределение, потребление	Высокая плотность накопления	Технология на стадии развития
Механические: маховики	Годы	Потребление	Высокая точность, отзывчивость, надежность, высокая плотность накопления	Не подходят для накопления в больших масштабах

Опираясь на данные таблиц 1.3 и 1.4, можно сказать, что наиболее эффективные и востребованные типы накопителей энергии в автономных энергосистемах на сегодняшний день – это литий-ионные аккумуляторные батареи, суперконденсаторы, сверхпроводниковые накопители и маховики.

Обобщенное сравнение характеристик различных типов накопителей представлено в таблице 1.5 [15].

Таблица 1.5 – Сравнение технических характеристик различных накопителей энергии

Тип	Плотность энергии, Вт·ч/л	Плотность мощности, Вт/л	Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	Удельная мощность, Вт/кг	Саморазряд в день, %	Срок эксплуатации, лет	Число циклов	КПД, %	Время отклика
ВАЭС	2-6	0,5-2	30-60	-	~0	20-40	8000-12000	42-70	с
Маховик	20-80	1000-5000	5-100	400-1500	~20% в час	15-20	20000	90-95	с
Свинцово-кислотные	50-80	10-400	25-50	75-300	>0,3	5-15	21000	63-90	мс
Li-ion	200-500	1500-10000	75-200	150-2000	~0.05%	14-16	200-1800	75-97	мс
Na-S	150-300	140-180	100-240	90-230	~0	10-20	2500-4500	75-90	мс
NiCd	15-150	80-600	45-80	150-300	>0,6	15-20	2000-3500	60-83	мс
Ванадий-редоксные	16-35	<2	10-30	150	~0	10-20	12000	65-85	-
ZnBr	30-65	<25	30-80	100	~0	5-10	1500-2000	65-85	-
Полисульфидные	20-30	<2	15-30	-	50% в 15 мин	10-15	-	60-75	мс
Конденсатор	0,05-10	>100000	0,05-5	3000-10 ⁷	20-30%	1-10	5-50000	60-70	мс
СК	10-30	>100000	0,05-15	500-10000	10-15	10-30	>100000	84-97	мс
СПИН	0,2-6	1000-4000	0,5-75	500-2000	20-30	20-30	100000	95-98	мс
Термические	80-500	-	80-250	10-30	>25	25-30	-	30-60	мин
Жидкий воздух	-	-	200	-	-	-	-	55-80	мин

Таким образом, приведен краткий обзор существующих типов накопителей энергии, а также описаны их технические характеристики. Выбор той или иной технологии накопления будет зависеть во многом от области применения СНЭ.

1.2 Области применения накопителей энергии в энергосистемах

Возможности СНЭ позволяют решать ряд задач, характерных как для объектов, подключенных к единой энергосистеме, так и для объектов в автономных энергосистемах [19].

Ошибочно считать, что единственной и основной целью СНЭ является обеспечение системы резервным питанием. С развитием технологий СНЭ становится важной частью энергосистемы. Из-за значительного увеличения доли ВИЭ в составе традиционных энергосистем актуальным стало применение СНЭ для решения многочисленных задач интеграции ВИЭ в энергосистему (для стабилизации выработки мощности и регулирования частоты в сети, а также для хранения избыточной энергии). Кроме того, СНЭ также используются для выравнивания нагрузки, сглаживания пиков, управления потреблением и т. д.

Области применения накопителей энергии схематично обозначены на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Области применения накопителей энергии

Функции, выполняемые СНЭ, подразделяются на 3 класса [19]:

- Класс А. Функции, подразумевающие кратковременное использование СНЭ, при котором установка потребляет/выдаёт необходимую энергию в течение кратковременного рабочего цикла (рабочий цикл СНЭ длится меньше 1 часа);
- Класс В. Функции, подразумевающие длительное использование СНЭ, при котором установка потребляет/выдаёт необходимую энергию в течение продолжительного рабочего цикла (рабочий цикл СНЭ длится более 1 часа);
- Класс С. Функции резервного источника электропитания в аварийном режиме, когда основной источник электропитания недоступен.

В таблице 1.6 приведены различные области применения СНЭ, а также их требуемая мощность, время отклика и продолжительность разряда [15,19]. В этой таблице перечислены возможные варианты применения СНЭ, помимо их основной функции хранения энергии. Различные типы СНЭ подходят для различных задач. Таким образом, необходимо заранее проанализировать, подходит ли конкретный тип СНЭ для конкретной задачи или же его превосходят другие типы.

Таблица 1.6 – Различные сферы использования накопителей и требования к их мощности, времени отклика и продолжительности разряда

Класс, название функции	Требуемая мощность	Время отклика	Требуемая продолжительность разряда
А. Качество электроэнергии	до 1 МВт	миллисекунды	миллисекунды-секунды
Б. Управление потреблением	Более 100 МВт/1-100 МВт	минуты	часы-дни
А. Устранение перебоев ВИЭ	до 20 МВт	до 1 секунды	минуты-часы
С. Резервный источник	до 40 МВт	секунды-минуты	дни
Б. Сглаживание графика нагрузки	до 100 МВт	до 1 секунды	часы
Б. Отсрочка потребления	до 100 МВт	минуты	часы

Продолжение таблицы 1.6

Класс, название функции	Требуемая мощность	Время отклика	Требуемая продолжительность разряда
Б. Сглаживание пиков	до 100 МВт	минуты	часы
А. Регулирование напряжения	до 10 МВт	миллисекунды	секунды-минуты
А. Передача и распределение	до 100 МВт	миллисекунды	миллисекунды-секунды
А. Восстановление после аварий	до 40 МВт	минуты	секунды-часы
А. Подавление частотных колебаний	до 1 МВт	миллисекунды	минуты
А. Вращающийся резерв	до 1 МВт	секунды	минуты-часы
А. Транспорт	до 100 кВт	миллисекунды	секунды-часы
А. Надежность конечных потребителей	до 1 МВт	миллисекунды	минуты-часы-дни
А. Помощь при пуске двигателей	до 1 МВт	миллисекунды	секунды-минуты
А. Бесперебойный источник питания	до 5 МВт	миллисекунды	минуты-часы
С. Отсрочка расширения мощности ПС	10–100 МВт	минуты	минуты-часы-дни
С. Резерв	1–100 МВт	минуты	минуты-часы-дни

Система накопления энергии – многофункциональное устройство (рисунок 1.5) [8]. Каждая СНЭ (при соответствующей комплектации, конструкции и системе управления) способна выполнять широкий набор функций, относящихся к одному или нескольким классам, причём выдаваемые СНЭ активная и реактивная мощности могут регулироваться независимо друг от друга. Этим обусловлен синергетический эффект применения накопителей в энергосистеме [19].

До 2019 года более половины проектов было нацелено на участие в рынке регулирования частоты. Активное внедрение СНЭ для задач регулирования частоты связано с увеличением доли ВИЭ, где стоит проблема непостоянства энергоносителя ветровых и солнечных электростанций [5,6].

Так как важной особенностью СНЭ является возможность выполнять несколько функций, то, как правило, их используют для решения двух и более задач (рисунок 1.6) [8]. Например, СНЭ может одновременно сглаживать график нагрузки и регулировать частоту в сети.

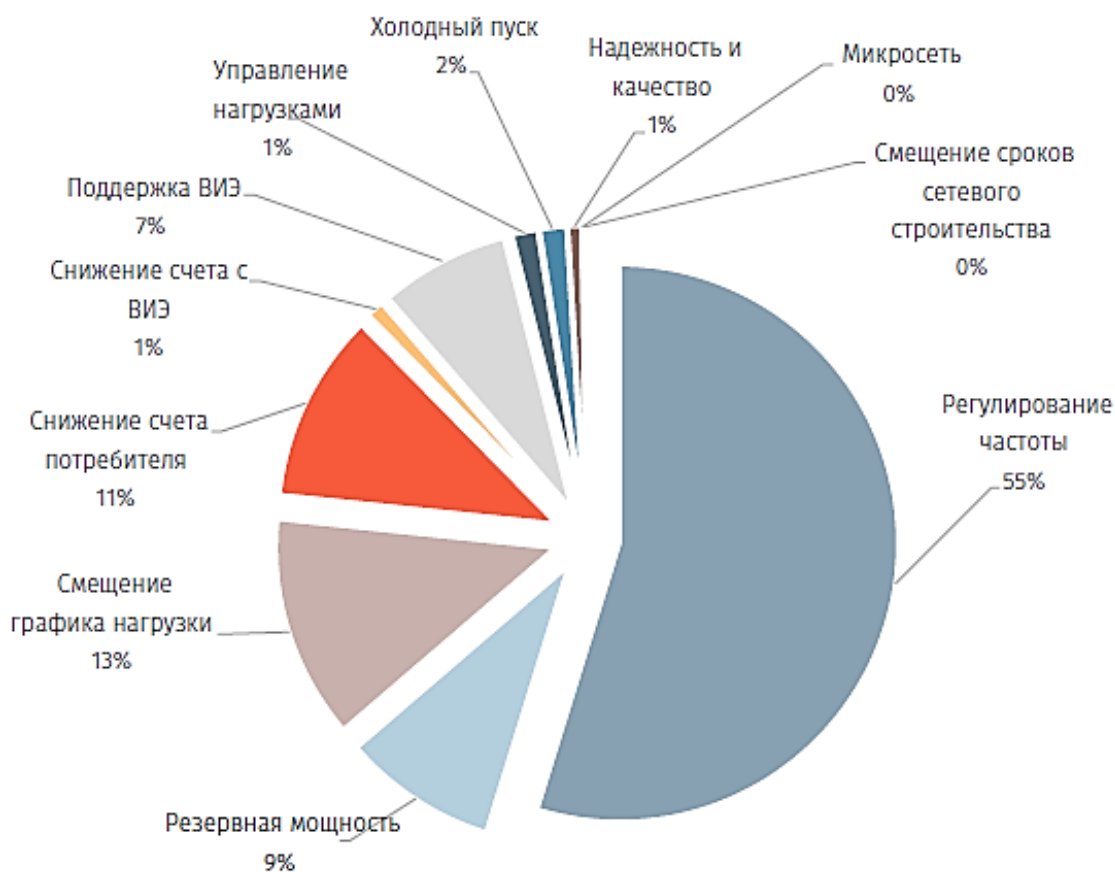


Рисунок 1.5 - Структура целевого использования СНЭ до 2019 года

Таким образом, современные быстродействующие технологии накопления энергии позволяют решать сразу несколько проектных задач и гораздо более эффективно, чем традиционными методами. С активным внедрением ВИЭ накопители стали незаменимым и значимым элементом электроэнергетического комплекса. Одно из главных требований к их параметрам – быстрота отклика на управляющее воздействие. Выбор той или иной технологии будет зависеть от технико-экономического расчета в отдельно взятом проекте.

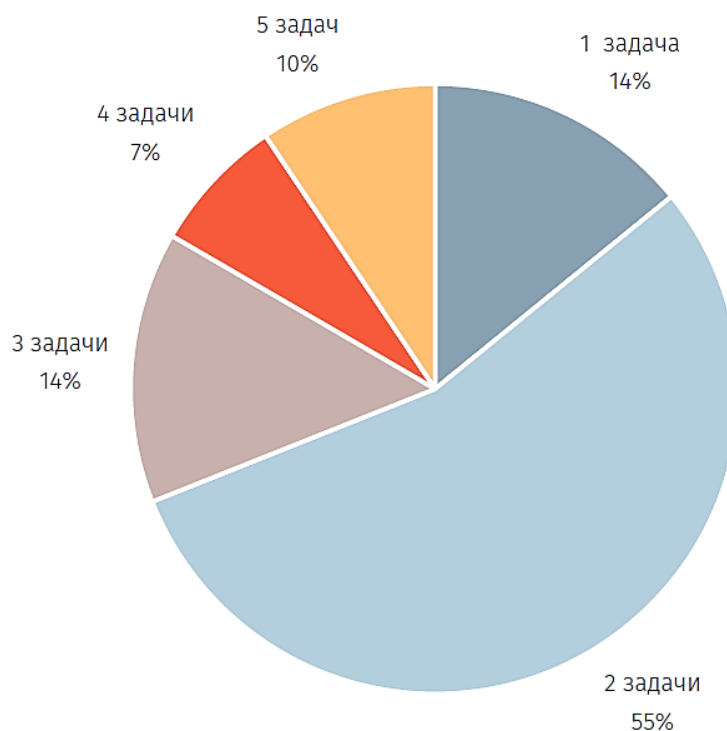


Рисунок 1.6 – Среднее количество решаемых СНЭ задач в проектах

1.3 Мировой и отечественный опыт применения накопителей энергии

В мире с высоким темпом вводятся электростанции на основе ВИЭ. Ветровые и солнечные электростанции с помощью СНЭ к 2050 году будут покрывать около 56% мирового спроса на электроэнергию. Доля солнечных и ветровых электростанций в странах-лидерах будет достигать 70–80% всей генерации. Кроме того, согласно прогнозу, представленному на рисунке 1.7, суммарная мощность/энергоёмкость СНЭ в мире увеличится с 9 ГВт/17 ГВт·ч (2018 г.) до 1095 ГВт/2850 ГВт·ч (2040 г.). Около половины всех СНЭ будет установлено в Китае, США и Индии [20].

На данный момент существует множество проектов со СНЭ на базе различных технологий накопления. На рисунке 1.5 представлена структура проектов с целевым использованием СНЭ до 2019 года в мире. Из рисунка видно, что СНЭ стали чаще всего применяли для регулирования частоты. Рост участия СНЭ на рынке системных услуг связано с тем, что 1 МВт мощности быстродействующей СНЭ может заместить 1,7 МВт резерва мощности гидроэлектростанции и 29 МВт мощности тепловых станций. Однако

создание законодательной и регуляторной базы для участия СНЭ на рынке системных услуг находится в стадии становления [8].

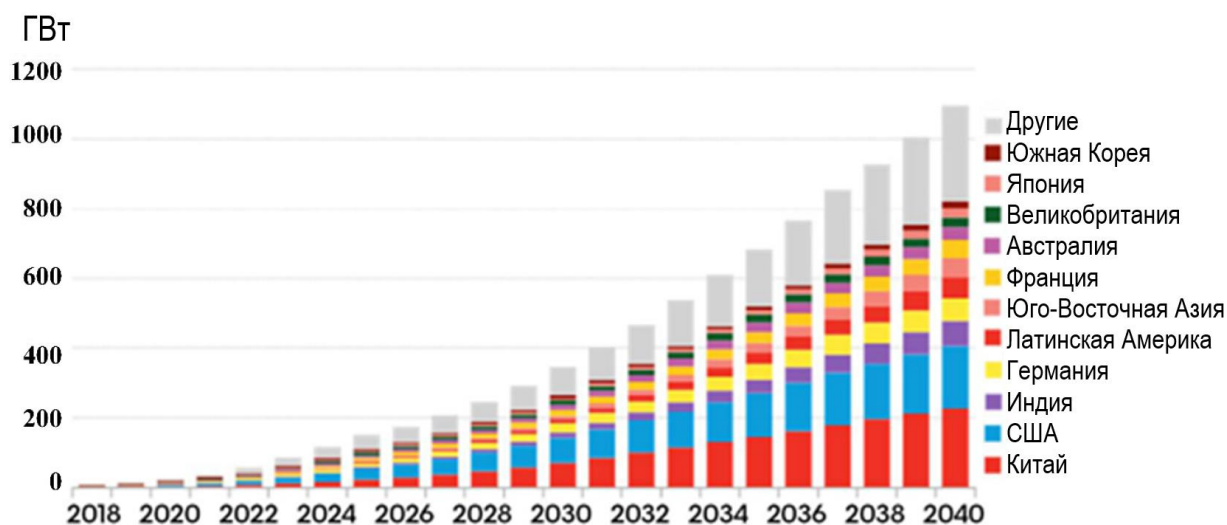


Рисунок 1.7 – Прогноз развития суммарной установленной мощности и энергоемкости СНЭ

Активный рост спроса на СНЭ также связан с тем, что происходит массовое промышленное освоение технологии производства ЛИАБ и резкое снижение из стоимости. Аналогичная ситуация с развитием и стоимостью силовой электроники, основой подсистемы преобразования СНЭ.

В России спрос на СНЭ в меньшей мере связан с внедрением ВИЭ. Развитие рынка СНЭ в России возможно по трем сценариям:

- «Интернет энергия» - использование систем хранения электроэнергии в составе распределенной энергетики (применение СНЭ в изолированных и удаленных районах, жилых комплексах, электрическом транспорте, зарядной инфраструктуре);
- «Новая Генеральная схема» - использование систем хранения электроэнергии в составе крупной централизованной энергетики (управление суточным графиком нагрузки, качеством электроэнергии, системные услуги);

- «Экспорт водорода» - аккумулирование электроэнергии в водородном цикле (поставки в другие страны водородного топлива, полученного в процессе электролиза воды)

В России технологии ЛИАБ и маховиков находятся на стадии масштабирования, т. е. происходит увеличение масштабов производства. Но по показателям они отстают от мировых образцов (рисунок 1.8). Что касается суперконденсаторов (образцы соответствуют мировому уровню) и СПИН, то эти технологии находятся на стадии демонстрации и редко применяются в проектах [13].

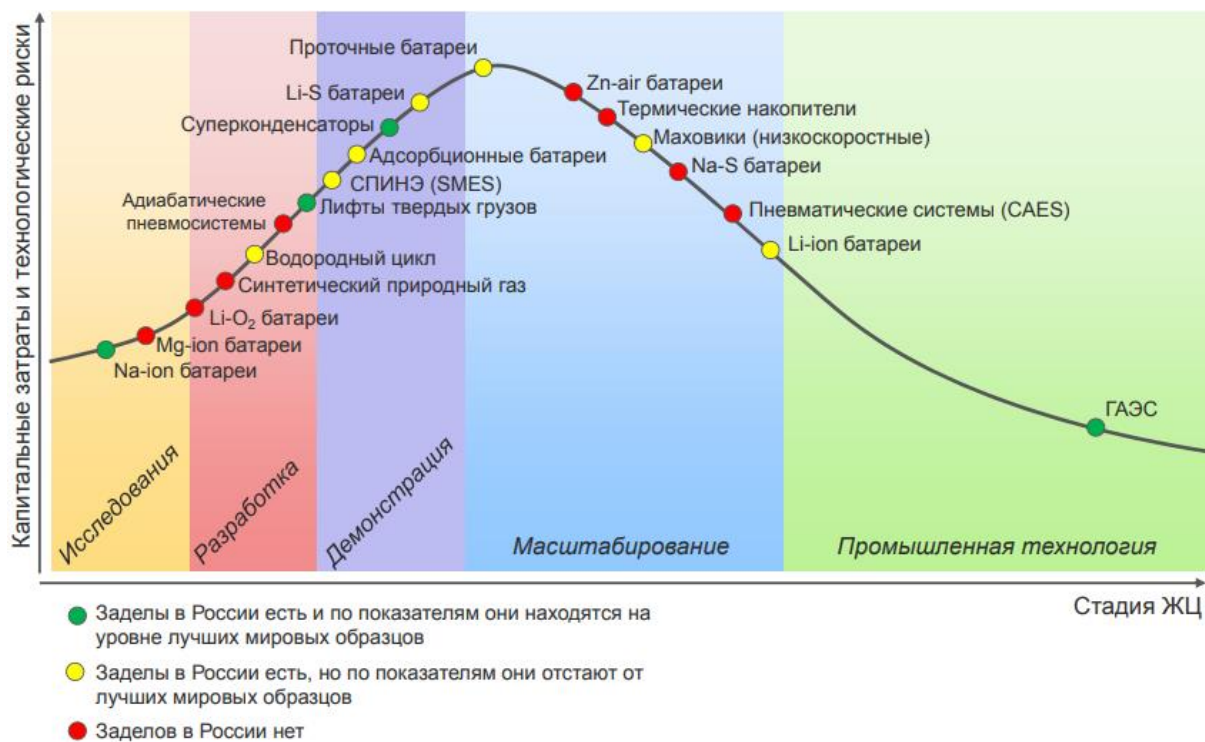


Рисунок 1.8 - Российский научно-технический задел в области технологий СНЭ в сравнении с мировым уровнем

Для отработки технологий внедрение накопителей должно начинаться на автономных электростанциях малых мощностей (10–20 МВт). Автономное электроснабжение на базе широко применяется в промышленной индустрии, строительстве, сельском и коммунальном хозяйствах. В зависимости от поставленных целей в том или ином проекте по внедрению СНЭ необходимо провести соответствующее исследование.

2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Чем быстрее развивается теория и больше накапливается научной информации, тем быстрее должны развиваться методы исследований и тем более тонкими, изящными и обобщающими они должны быть. Моделирование облегчают единое описание процессов в самых различных сферах природы.

Существует несколько основных методов исследований в электроэнергетике: натурное экспериментирование, физическое и математическое моделирование, цифровое моделирование в реальном времени (Real-Time Digital Simulator - RTDS).

2.1 Натурные эксперименты

Натурные испытания для инженера не только облегчают подход к изучению той или иной проблемы, но и является средством непосредственного решения технических задач. Его роль значительнее, так как он часто еще и помогает найти наилучший подход к аналитическому решению. Недооценка роли экспериментальных данных в синтезе знаний приводит к частым ошибкам в оценке новых фактических данных и к задержке внедрения новых разработок

Именно эксперименты подсказывают ход аналитических решений в развитии теории и путей внедрения новых разработок. Как бы ни были интересны и «красивы» отвлеченные математические построения, для фактического решения практических вопросов всегда требуется эксперимент, хотя иногда необходимость в нем не проявлялась явно.

Итак, натурное экспериментирование, практическое воспроизведение исследуемых явлений на моделях представляет собой реальную основу научного и тем более инженерно-научного творчества.

2.2 Физическое моделирование (электродинамические модели)

Электроэнергетическая система, осуществляющая выработку, преобразование, передачу, распределение и потребление электроэнергии, является системой, состоящей из взаимосвязанных подсистем, содержащих множество элементов. Система в целом приобретает свойства, не присущие отдельным подсистемам и тем более их элементам. Методы анализа таких систем очень громоздки. Для их практического выполнения нужны допущения, которые могут внести существенные искажения. Методы расчета, применяемые для практических целей, требуют экспериментальной проверки. Для того, чтобы иметь возможность быстро оценивать работоспособность, эффективность и надежность новой аппаратуры, новых устройств, проверять новые теории, новые методы и оценивать допущения и предпосылки существующих методов, нужна возможность экспериментов в системе, позволяющая имитировать любые режимы, воспроизводить любые аварии, наблюдать и выявлять их последствия. Возможности проведения экспериментов в реальной промышленной системе очень ограничены. Те наблюдения за «естественно» происходящими авариями должны подвергаться обработке и представляться в критериальных зависимостях, распространяющих данные единичного опыта на целый ряд подобных систем и условий. Однако затруднительность и принципиальная ограниченность возможности получения этих материалов заставляют инженера-исследователя обращаться к опытной, специально созданной системе. Очевидно, экспериментальной системой может быть только физическая модель.

Физическое моделирование – это вид моделирования характеризуется прежде всего тем, что исследования, проводятся на установках, обладающих физическим подобием, т. е. сохраняющих полностью или хотя бы в основном природу явлений. Если осуществлено полное или неполное физическое моделирование и соответственно подобие, то по характеристиках модели

можно получить все характеристики оригинала пересчетом через масштабные коэффициенты.

Если наиболее существенные с точки зрения поставленной задачи процессы подобны, то явления или системы считаются подобными. Процессы будут подобны друг другу, если существует некоторое соответствие сходственных величин рассматриваемых систем: положения точек, геометрических размеров, параметров систем и параметров процессов.

Обычно соотношение подобия имеет вид:

$$m_i = \frac{P_i}{R_i},$$

где P_i , R_i – сходственные параметры процессов и элементов рассматриваемых систем; m_i – коэффициент подобия, или масштаб, сходственных параметров.

Понятие сходственных точек и сходственных величин, известные и геометрии, значительно сложнее в теории подобия физических явлений. В этом случае сходственными точками пространства, времени и параметров процесса будут такие величины, при которых их значениям в одной системе будут так или иначе соответствовать значения в другой (частный случай соответствия – пропорциональность).

Физическая модель энергосистемы представляет собой миниатюрную копию физически реальной энергосистемы, она имеет в своем составе модели всех основных элементов энергосистемы-оригинала. Для всякой модели энергосистемы всегда четко формулируется круг задач, который будет решаться с помощью данной модели. Это выявляет те части энергосистемы, которые должны быть воспроизведены на модели с наибольшей полнотой и точностью, требуемыми теорией и практической необходимостью. Например, если физическая модель сооружается для изучения переходных процессов, протекающих в электрической части системы, то тепловая и гидравлическая части системы (котлы, паровые турбины, напорные трубопроводы, гидротурбины и т. п.) могут моделироваться приближённо с помощью математических моделей.

Электродинамическими моделями (ЭДМ) называют модели электроэнергетических систем, состоящие из физических и математических моделей отдельных элементов. ЭДМ нашли широкое применения на практике. В них, как правило, моделируется основная, силовая часть энергосистемы. Вспомогательные элементы, такие, как релейная защита, регуляторы возбуждения и частоты, обменной мощности и др. устанавливаются на модели непосредственно натуральными (немоделированными). Поэтому в отношении этих элементов не возникает проблемы точности их воспроизведения. Основной задачей моделирования в ЭДМ является получение информации о происходящих процессах, которая может использоваться для уточнения математических моделей, с помощью которых далее можно проводить численные исследования.

На ЭДМ проводятся разнообразные работы. Основные направления этих работ следующие:

1. Исследования, направленные на уточнение характеристик систем в целом, например изучение частотных характеристик, влияние состава нагрузки, поведения регуляторов при тех или иных изменениях в нагрузках или схемах систем.
2. Проверка теоретических положений, допущений и приближений, принимаемых в различных аналитических методах расчета. Так проводились весьма многочисленные и разнообразные работы этого рода. К ним относится уточнение методики расчета статической устойчивости и т. д.
3. Проверка, настройка, регулировка устройств релейной защиты, регуляторов возбуждения, систем автоматического управления (включения резервов и пр.) в условиях нормальных и аварийных режимов электростанций и электропередач. В качестве примера можно привести исследования регуляторов сильного действия, теоретическая разработка которых, практическая наладка и регулировка были произведены на ЭДМ МЭИ, благодаря чему не потребовалось большого количества дорогостоящих опытов непосредственно на мощной Волжской ГЭС, где

были впоследствии установлены эти регуляторы. Другим примером может служить исследование релейной защиты для электропередачи от той же ГЭС в Москву.

4. Исследования, направленные на уточнение конструкции и отдельных параметров элементов сооружаемых электропередач и проверку их работы в системе. В качестве примера можно привести экспериментальное изучение параметров успокоительных систем у явнополюсных синхронных машин и их влияние на устойчивость, характер качаний и условий самовозбуждения машин.
5. Исследования режимов и переходных процессов в некоторых конкретных системах с заданными параметрами. К такого рода исследованиям, неоднократно проводившимися на ЭДМ МЭИ и моделях других организаций, относятся работы, связанные с оценкой появляющихся в переходных процессах перенапряжений, оценкой эффективности демпферных обмоток, испытаний схем самосинхронизации и схем для ограничения перенапряжений на конденсаторах.
6. Контрольные опыты по уточнению пределов устойчивости тех или иных конкретных систем. Так, например, уточнялись предельные мощности упомянутой выше электропередачи при различных способах автоматического регулирования, несимметричных режимов, однофазных повторных включения и многих других режимах и процессах.
7. Учебные задачи. Модели могут быть широко использованы в эргатических задачах, рассматривающих взаимодействие человека и различного рода устройств, машин, автоматов. На моделях широко проводится демонстрация различных переходных процессов и аварийных режимов, выполняются учебные работы по ликвидации аварийных режимов, воспроизводимых на модели, и таким образом осуществляется обучение студентов, и тренировка персонала электрических станций и систем.

2.3 Математическое моделирование

Математическая модель — это математическая запись, составленная на основании суммы образов и содержащая описание динамики физических или других (например, экономических) закономерностей.

К математическим моделям можно отнести модели, являющиеся средством связи теории с объективной действительностью, средством для проверки теории. Простейшим примером математической модели в электроэнергетике является схемы замещения трансформаторов, реакторов, двигателей, генераторов, линий электропередачи и т. п. Схемы замещения состоят из простейших элементов (сопротивлений, источников ЭДС или тока), ранее хорошо изученных, и отражают уравнения и их физическую интерпретацию. Также к математическим моделям можно отнести программы и алгоритмы, составленные в специализированном ПО.

2.4 Цифровое моделирование в реальном времени

Последний разработанный способ для моделирования процессов в электроэнергетике – это моделирование с помощью цифрового программно-аппаратного комплекса RTDS (Real-Time Digital Simulator). RTDS предназначен для симуляции в реальном времени электромагнитных и электромеханических процессов моделируемой энергосистемы с одновременным формированием соответствующих электрических сигналов. RTDS объединяет реальные электроэнергетические объекты с виртуальной моделью энергосистемы, где они эксплуатируются. RTDS позволяет испытывать устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) с полноценной обратной связью и реакцией на изменения их состояния.

Использование RTDS позволяет:

- выполнять испытания РЗА;
- исследовать автоматику энергосистем в динамических режимах;
- исследовать работу контроллеров для силовой электроники;

- проводить анализ качества электрической энергии;
- исследовать взаимодействие и совместимость оборудования;
- изучать взаимодействия между системами на постоянном и переменном напряжении.

Для того, чтобы произвести испытание того или иного оборудования его подключают к RTDS. На рисунке 2.1 схематично изображена схема соединения RTDS с внешним оборудованием. Подключенное оборудование при этом функционирует также, как и при подключении к реальной энергосистеме, что является важнейшим преимуществом RTDS, по сравнению с другими методами исследований.

Вычислительные возможности современных RTDS позволяют рассчитывать электроэнергетической системы (ЭЭС) с 600 узлами с шагом выполнения расчетов моделируемой ЭЭС 20–30 мкс [23].

Программы для расчета электромагнитных переходных процессов (ПП), как правило, использовались для подробного моделирования небольшой части энергосистемы, в то время как инструменты для расчета устойчивости (TSAT) в момент ПП используют упрощенное представление больших ЭЭС в векторном виде.

RTDS позволяют детально исследовать ПП на сравнительно небольшом фрагменте ЭЭС. В таких случаях, в целях экономии вычислительных ресурсов, в качестве модели примыкающей ЭЭС используют ее эквивалентное сопротивление, что не оставляет возможности отслеживать ПП в ЭЭС. По мере роста числа силовых электронных устройств возникла острая необходимость в разрыве между подробным и сложным моделированием электромагнитных ПП таких устройств и их динамическим взаимодействием с крупномасштабной энергосистемой.

Именно гибридное моделирование может объединить возможности симуляторов (RTDS) и программ расчета устойчивости (TSAT). Компанией Powertech Labs был разработан специальный интерфейс TSAT-RTDS

(рисунок 2.2.), который позволяет выполнять расчет устойчивости в реальном времени для ЭЭС с более чем 5000 шинами [24].

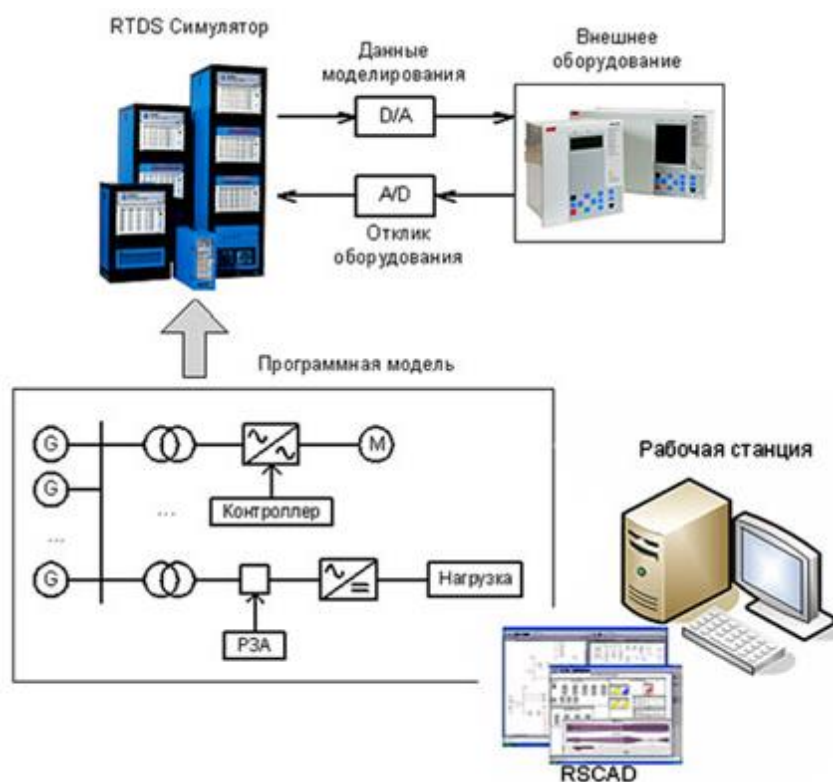


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема подключения внешнего оборудования к RTDS

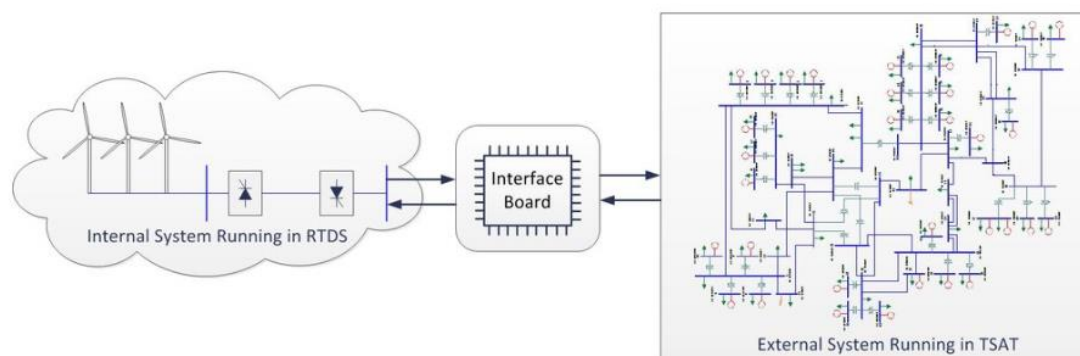


Рисунок 2.2 – Объединение RTDS и TSAT

Рассмотрим представленные методы исследования процессов в электроэнергетике применительно к СНЭ.

3 НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГОЛОВНОГО ЭКЗЕМПЛЯРА СЕРИЙНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ СНЭ-10-1200-400 В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Как было сказано ранее, натурное экспериментирование несомненно является главным и самым убедительным методом исследования процессов в электроэнергетике. Данный метод может использоваться для проверки работоспособности и эффективности принципиально новых объектов, таких как СНЭ. Рассмотрим результаты натурального эксперимента и исследований системы накопления энергии, выполненные ООО «СНЭ», ООО «СПТ» и НГТУ 24 мая 2019 года в Новосибирске. Испытания проводились с головным промышленным образцом СНЭ-10-1200-400 УХЛ1 мощностью 1200 кВт·А, энергоемкостью 400 кВт·ч, номинальным напряжением 10 кВ производства ООО «СНЭ», предназначенного для работы в составе автономной системы электроснабжения на базе ГПУ (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка для испытаний совместной работы СНЭ-10-1200-400 и ГПУ

Целью испытаний была проверка соответствия головного образца СНЭ, параметров системы в целом и каждой из её подсистем требованиям технического задания, подтверждение эффективности СНЭ для обеспечения режима сглаживания набросов/сбросов мощности нагрузки (ограничения скорости нарастания/убывания мощности, потребляемой от ГПУ).

3.1 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки для испытания СНЭ представлена на рисунке 3.2. В состав установки входили: две ГПУ, силовые трансформаторы, секционированная активная нагрузка, величина которой дискретно изменяется с помощью коммутационных аппаратов, система накопления энергии, контрольно-измерительное и регистрирующее оборудование, система управления.

В составе экспериментальной установки использованы две ГПУ GmbH MWM TCG 2020 V12K с генераторами AvK DIG 120 i/4, работающие на природном газе. Технические характеристики ГПУ приведены в таблице 3.1 [25].

Таблица 3.1 – Технические характеристики газопоршневых установок на частоте 50 Гц.

Электрическая мощность, кВт	1125
Тепловая мощность, кВт	1253
Электрический КПД, %	40,9
Тепловой КПД, %	45,6
Общий КПД, %	86,5
Капитальный ремонт при работе на природном газе, через, ч	64000
Скорость вращения, мин ⁻¹	1500
Средняя скорость поршня, м/с	9,8
Сухой вес агрегата, кг	11700

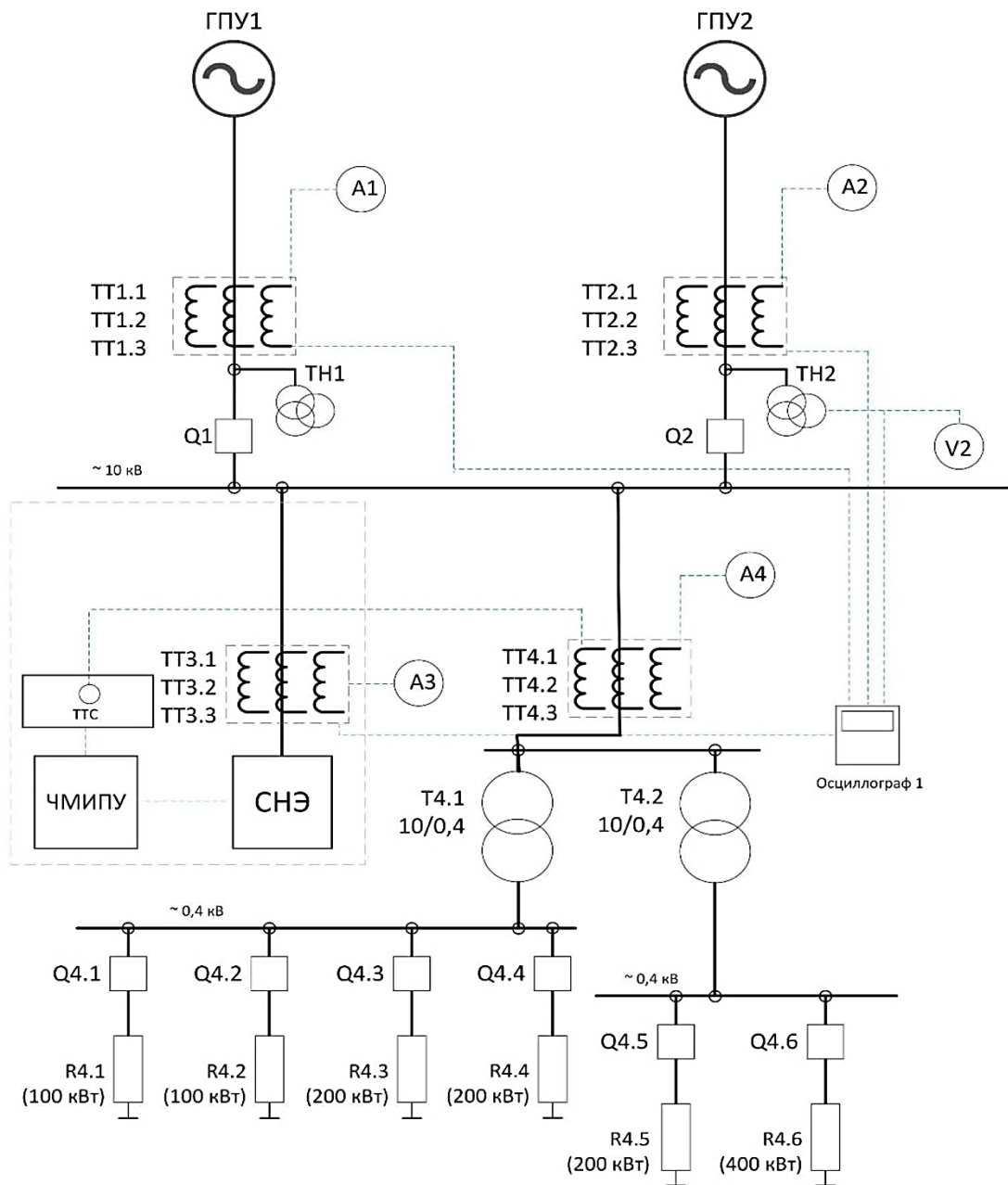


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема испытательной экспериментальной установки

(СНЭ – система накопления энергии, ГПУ1, ГПУ2 – газопоршневые установки, Т4.1, Т4.2 – силовые трансформаторы, R4.1-R4.6 – активные нагрузочные сопротивления, Q1, Q2, Q4.1 – Q4.6 – выключатели, ТН1 и ТН2 – измерительные трансформаторы напряжения, ТТ1.1 – ТТ4.3 – измерительные трансформаторы тока, ЧМИПУ - человеко-машинный интерфейс подсистемы управления, ТТС- трансформатор тока суммирующий)

Для моделирования активной резко переменной нагрузки использовался модуль коммутирования нагрузки (МКН), позволяющий с

заданной периодичностью подключать и отключать блоки активной нагрузки:

- 2 нагрузочных блока (модуля) ИС-400-100, с активной нагрузкой 100 кВт каждый;
- 2 нагрузочных блока (LOAD BANKS), с активной нагрузкой 400 кВт каждый (мощность одного из блоков искусственно ограничена до 200 кВт);
- 2 нагрузочных блока (электрокалориферы) КЭВ-60, с активной нагрузкой 200 кВт каждый.

В качестве испытуемой системы накопления энергии использовалась СНЭ-10-1200-400. В ходе испытаний СНЭ должна была обеспечивать режим сглаживания набросов/сбросов мощности нагрузки в экспериментальной автономной системе. Связь между литий-ионными аккумуляторными батареями и энергосистемой осуществляется с помощью силового трансформатора и двунаправленного транзисторного преобразователя, собранного по классической трёхфазной мостовой схеме.

В подсистеме накопления (ПН) использовались аккумуляторы GBS-LFP100АН, имеющие технические характеристики, приведённые в таблице 3.2 [26]. Основным элементом ПН - аккумуляторный модуль МА6х200.600, представляющий собой сборку из шести аккумуляторных ячеек ёмкостью по 200 А·ч, собранных последовательно, элементов системы управления аккумуляторной батареей и корпуса. В СНЭ используются две модификации модулей – с положительным и отрицательным электродами. Технические характеристики модуля представлены в таблице 3.3.

Модули размещаются в шесть рядов на стеллажах. Каждая батарея (из трех) состоит из двух стеллажей: в первом, помимо 15 модулей, располагается коммутационное силовое оборудование и вторичные цепи, а во втором размещены 18 аккумуляторных модулей.

Таблица 3.2 – Технические характеристики GBS-LFP100AH

Емкость, А·ч	100
Материал положительного электрода	литий-феррум-фосфат
Номинальное напряжение, В	3,2
Максимальный длительно допустимый ток разряда, А	300
Максимальный длительно допустимый ток заряда, А	100
Максимальный импульсный ток разряда, А	1000
Внутреннее сопротивление, Ом, не более	0,6
Саморазряд в месяц, %, не более	1
Количество циклов зарядки, раз, более	2000
Масса, кг	2,8
Габаритные размеры, ДхГхВ, мм	126x65x253
Температура эксплуатации, °С	-20...+65

Таблица 3.3 – Технические данные аккумуляторного модуля МА6х200.600

Тип аккумуляторов	GBS-LFP100AH
Количество аккумуляторов	12
Количество аккумуляторных ячеек	6
Номинальное напряжение, В	19,2

Подсистема преобразования электрической энергии (ПП) реализована на базе трех трехфазных силовых преобразователей по 400 кВт·А каждый и выполняет следующие функции:

- преобразование трехфазного напряжения переменного тока промышленной частоты в напряжение постоянного тока и заряд аккумуляторов ПН;
- поддержание аккумуляторов ПН в режиме, обеспечивающем их работоспособность и наибольший ресурс;
- преобразование напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока промышленной частоты и выдачу мощности на нагрузку или в сеть.

В системе управления преобразователя использованы элементы теории мгновенной мощности и блок фазовой подстройки частоты (phase locked loop) [27,28].

3.2 Программа испытаний

Программа испытаний включала следующие опыты:

1. Проверка работоспособности СНЭ при реализации первого алгоритма в режиме ограничения скорости изменения мощности ГПУ во время набросов и сбросов мощности нагрузки при разных рабочих циклах нагрузки и разных уставках по скорости изменения мощности.
2. Проверка работоспособности СНЭ при реализации второго алгоритма в режиме ограничения максимальной и минимальной мощности ГПУ в разных нагрузочных циклах при различных уставках.

При проведении испытаний первого алгоритма управления СНЭ скорость изменения суммарной мощности, генерируемой ГПУ 1 и 2, ограничивалась значением 22,5 кВт/с - 1 % от суммарной мощности (2250 кВт) двух ГПУ. В алгоритме управления СНЭ реализован экспоненциальный характер изменения мощности.

В ходе проведения опытов исследовались режимы работы СНЭ при компенсации набросов и сбросов нагрузки различной мощности - 100, 200, 400, 600, 800, 1200 кВт.

Испытательная схема показана на рисунке 3.1.

Начальное состояние схемы:

- выключатели Q4.1-Q4.3 отключены;
- выключатели Q1, Q2, Q4.4-Q4.6 включены;
- мощность нагрузки составляет 800 кВт;
- СНЭ находится в режиме ожидания.

Рабочие циклы изменения нагрузки (рисунок 3.3) моделировались путём коммутации нагрузочных активных сопротивлений. При этом базовая, неотключаемая нагрузка составляла 35–40 кВт (питание вентиляторов нагрузки, осветительное и бытовое оборудование испытательной установки).

Запись мгновенных значений токов ГПУ1, ГПУ2, СНЭ и напряжений на шинах 10 кВ производилась на цифровой осциллограф с частотой

дискретизации 25 кГц. На основании их рассчитывались все остальные мгновенные значения режимных параметров.

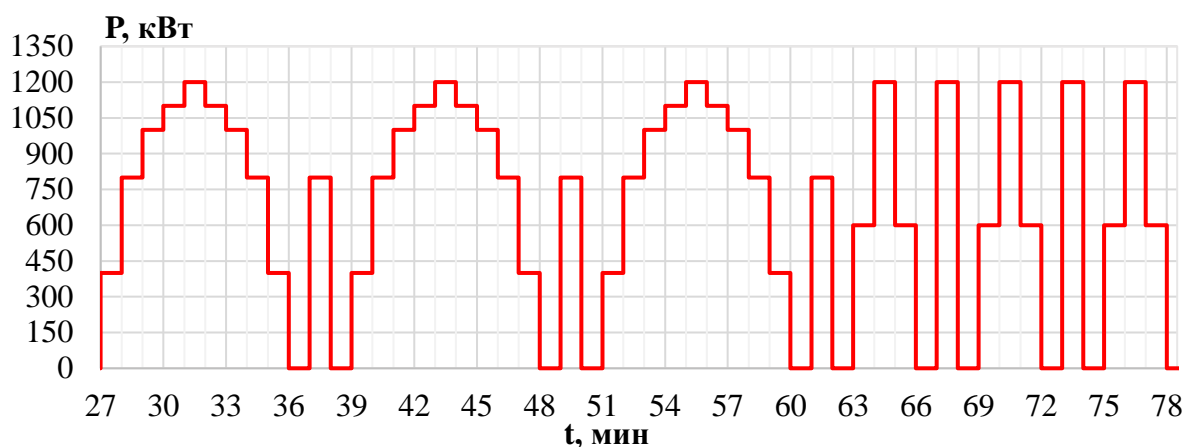


Рисунок 3.3 – Фрагмент переменной части рабочего цикла нагрузки с дискретностью 1 минута для проверки способности СНЭ компенсировать набросы и сбросы мощности

Фрагмент осциллограммы, полученной при реализации рабочего цикла для участка с 27 по 36 минутой, представлен на рисунке 3.4. Без участия СНЭ реализовать такой график нагрузки было бы невозможно – технологическая защита ГПУ отключила бы её при первом же броске мощности. СНЭ в начальный момент полностью «принимает на себя» наброс или сброс мощности нагрузки и плавно «передает» её на ГПУ по экспоненциальному закону.

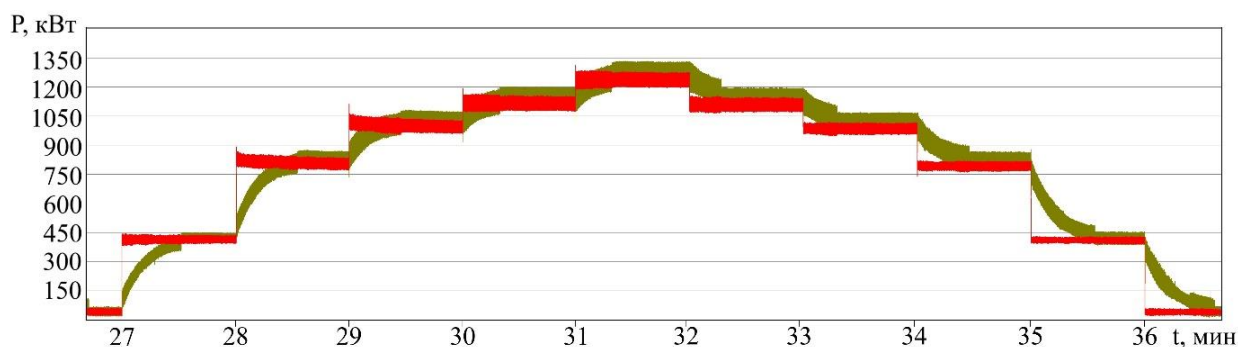


Рисунок 3.4 – Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (уставке) 22,5 кВт/с

Фрагмент осциллограммы, полученной при реализации рабочего цикла с 60 по 71 минуту, представлен на рисунке 3.5. Эксперимент показал высокую эффективность СНЭ при ограничении скорости изменения мощности ГПУ при набросах/сбросах нагрузки в диапазоне намного большем, чем в предыдущем случае - 600, 800 и 1200 кВт. Без СНЭ такие броски мощности приводят к безусловному срабатыванию технологической защиты и отключению ГПУ.

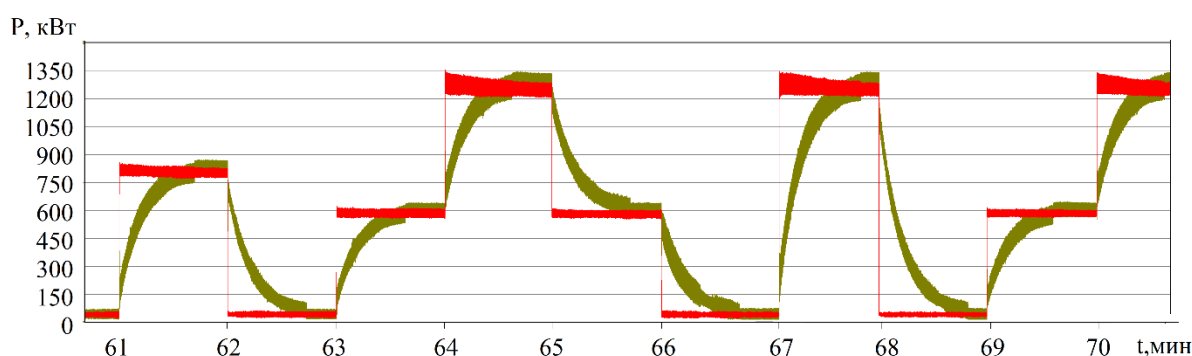


Рисунок 3.5 – Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (установке) 22,5 кВт/с

На рисунке 3.6 представлены осциллограммы, полученные при проведении опыта, аналогичного вышеописанным, но выполненному при более высокой частоте изменения нагрузки. Нагрузка изменялась в широком диапазоне каждые 10 секунд и поскольку допустимая скорость изменения мощности ГПУ была принята такой же, как и в описанных выше опытах, ГПУ не успевала выйти на режим полного покрытия нагрузки. За счёт этого при большей частоте резких изменений нагрузки значительно бóльшая доля её переменной составляющей обеспечивается ресурсами СНЭ.

Во всех описанных опытах СНЭ при каждом набросе нагрузки переходила в режим выдачи мощности, а при сбросе – в режим потребления избыточной мощности ГПУ, выполняя роль демпфера.

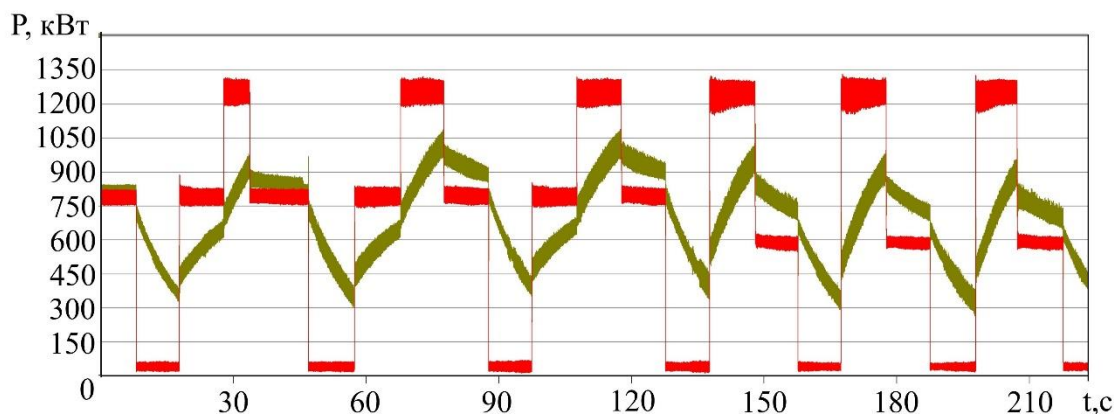


Рисунок 3.6 – Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (уставке) 22,5 кВт/с

На рисунках 3.7 и 3.8 приведены осциллограммы частоты, мощности ГПУ и нагрузки при критическом значении сброса нагрузки с 1200 до 1000 кВт с участием и без участия СНЭ. В этих опытах был реализован тот же алгоритм управления, который описан выше. Переходные процессы при участии СНЭ протекают со значительно меньшими отклонениями режимных параметров, прежде всего частоты, нежели без СНЭ, что благоприятно сказывается на условиях эксплуатации ГПУ и подтверждает эффективность реализованного алгоритма управления.

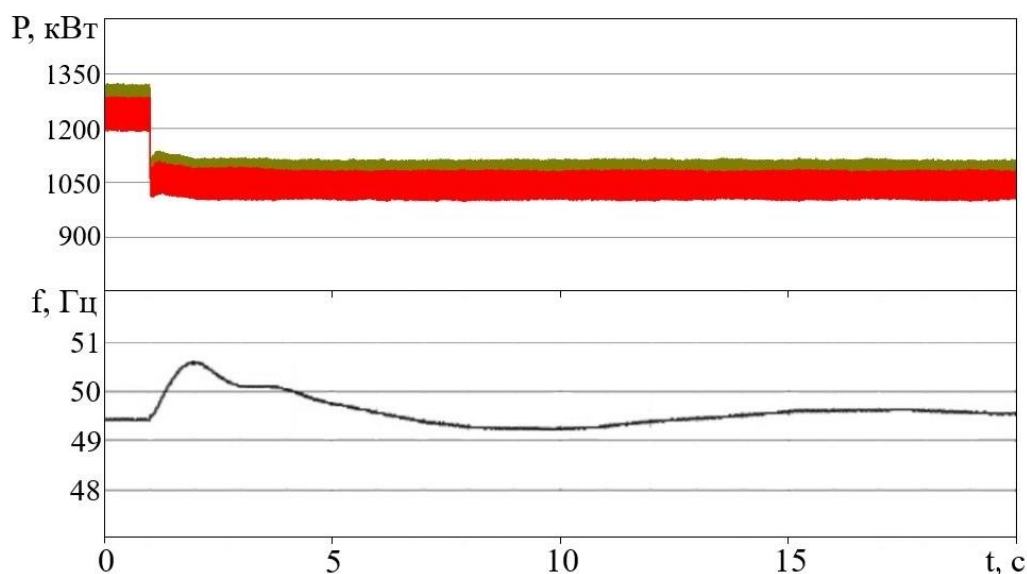


Рисунок 3.7 - Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет), мощности ГПУ (зеленый цвет) и мгновенного значения частоты на шинах ГПУ без СНЭ при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

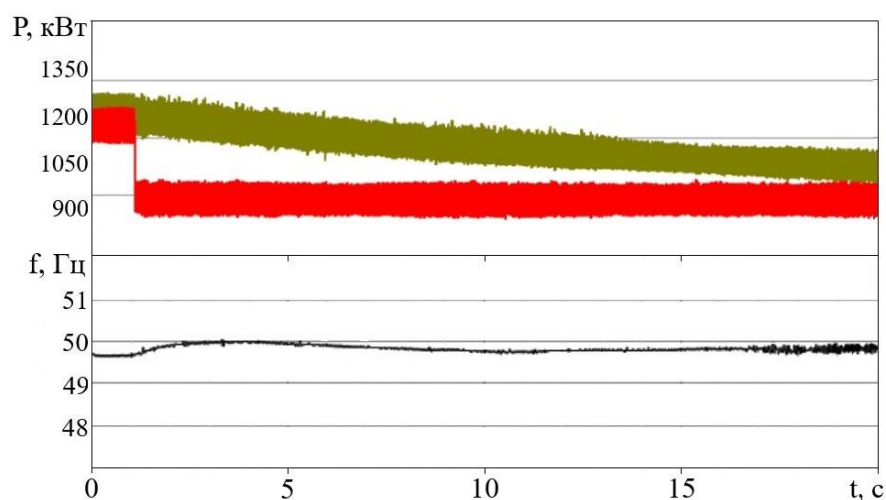


Рисунок 3.8 - Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет), мощности ГПУ (зеленый цвет) и мгновенного значения частоты на шинах ГПУ со СНЭ при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

При реализации первого алгоритма во всех выполненных опытах не было зафиксировано отключений ГПУ технологической защитой по причине набросов и сбросов мощности нагрузки. Время реакции СНЭ на наброс/сброс мощности нагрузки составило не более 10 мс. Значительно улучшилось качество переходных процессов. Подтверждена работоспособность СНЭ и показана эффективность алгоритма управления для сглаживания бросков мощности нагрузки.

В ходе испытаний второго алгоритма управления СНЭ, с предварительно заряженными аккумуляторами ПН, работала на ограничение суммарной максимальной и минимальной мощности двух ГПУ (нижняя уставка - 900 кВт, верхняя – 1100 кВт). При выходе мощности нагрузки за пределы указанных значений разница между уставкой и фактической нагрузкой компенсировалась за счёт СНЭ. Испытательная схема и начальные условия при проведении испытаний были теми же самыми, что и в предыдущем случае.

Во время испытаний задавался резко переменный график изменения мощности нагрузки от 800 кВт до 1200 кВт. Время реакции СНЭ на изменение мощности нагрузки не превышало заданного ограничения в 20 мс,

а мощность, генерируемая ГПУ 1 и 2, не выходила за установленные пределы 900 и 1100 кВт (рисунок 3.9).

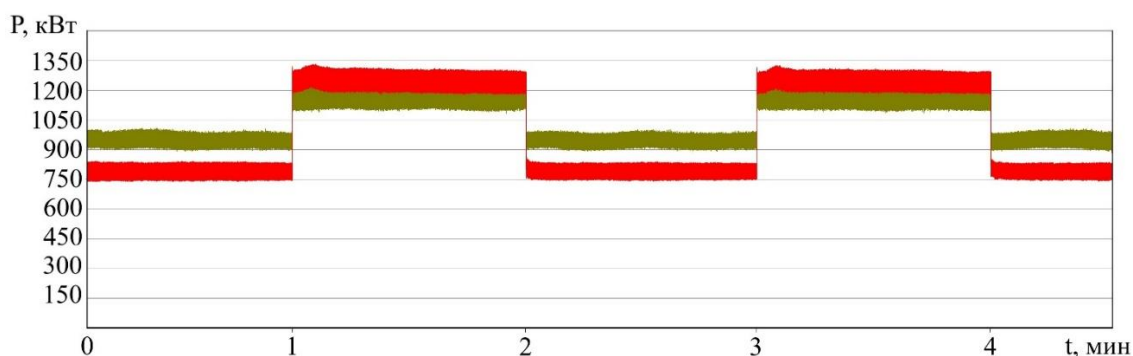


Рисунок 3.9 – Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при ограничении минимума и максимума мощности ГПУ

По такому же графику, но с разными ограничениями диапазона мощности был выполнен ряд опытов, которые подтвердили высокую эффективность СНЭ для решения поставленной задачи. При сближении значений верхней и нижней уставок происходит всё большее сглаживание графика мощности ГПУ и его приближение к среднему значению графика мощности нагрузки, что позволяет ГПУ работать в более экономичном режиме с меньшим удельным расходом топлива. К тому же появляется возможность замены «штатного» генераторного агрегата на агрегат меньшей мощности, близкой к среднему значению мощности графика нагрузки. Регулирование переменной части графика нагрузки в этом случае полностью выполняется за счёт СНЭ. При этом достигается комплексный эффект: минимальный удельный расход топлива, минимальная стоимость агрегата, минимальные издержки на его обслуживание, увеличение моторесурса приводного двигателя, снижение потерь в генераторе от переходных процессов, обусловленных резко переменной нагрузкой.

Время реакции СНЭ на изменение мощности нагрузки при проведении опытов составило не более 10 мс, а суммарная выходная мощность ГПУ1 и

ГПУ2, не выходила за установленные пределы - нижнюю и верхнюю уставки мощности.

Таким образом, впервые проведённые в России испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 (мощность 1200 кВА и энергоёмкость 400 кВт·ч) при совместной работе с ГПУ на резко переменную нагрузку в составе экспериментальной испытательной установки подтвердили работоспособность всех подсистем СНЭ и высокую эффективность предложенных алгоритмов. Реализованные алгоритмы управления СНЭ значительно улучшили условия эксплуатации ГПУ за счёт существенного снижения интенсивности переходных процессов, что ведёт к повышению технико-экономических показателей ГПУ.

Применение СНЭ совместно с ГПУ, работающей на резко переменную нагрузку, позволяет ограничивать скорость изменения мощности генератора до допустимых значений. За счёт этого существенно снижаются требования к типу генераторного агрегата, работающего на резко переменную нагрузку, что особенно актуально для автономных энергосистем, в составе которых эксплуатируются ГПУ. Кроме того, при ограничении скорости изменения мощности генератора при его работе на резко переменную нагрузку кардинально снижается амплитуда крутильных моментов на валу генератора, обеспечивается более благоприятный режим его работы, снижается расход топлива, экономится моторесурс ГПУ.

Использование СНЭ в режиме ограничения максимальной и минимальной нагрузки на ГПУ позволяет эксплуатировать ГПУ без риска отключений технологическими защитами при резко переменном графике нагрузки и в режимах малой нагрузки. Также, может быть достигнут значительный экономический эффект путем выбора генераторного агрегата не по максимальной мощности нагрузки, а с учетом ограничения её пиков. За счёт этого уменьшаются капитальные затраты на основное оборудование, затраты на запасные части, эксплуатационные издержки и снижается удельный расход топлива [10].

4 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭДМ НГТУ

Проведение натурных испытаний в реальных энергосистемах дорогостоящий процесс со множеством ограничений, поэтому физическое моделирование получило такое распространение. С помощью подобия можно переносить свойства реального электрооборудования на электродинамические модели (ЭДМ), которые можно использовать для натурных испытаний с получением высоко достоверных результатов. Такой электродинамической моделью энергосистемы располагает Новосибирский Государственный Технический Университет (НГТУ).

4.1 Назначение и описание электродинамической модели НГТУ

Электродинамическая модель (ЭДМ) энергосистемы - совокупность специального оборудования, имитирующего работу основных элементов электрической системы и предназначенного для физического моделирования энергосистем (рисунок 4.1). За исключением воздушных линий электропередачи, паровых и гидравлических турбин все остальные элементы энергосистемы представлены на ЭДМ масштабными физическими моделями. Параметры и конструкция силовых элементов ЭДМ подобраны таким образом, чтобы по возможности максимально удовлетворить критериям подобия при моделировании, прежде всего, переходных электромеханических процессов в энергосистемах.

Центр испытаний на базе ЭДМ обеспечивает:

- Подготовку и проведение испытаний на физической модели устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем.
- Разработку и согласование программ испытаний.
- Подготовку документальных отчетов по результатам испытаний.
- Подготовку экспертных заключений на соответствие установленным требованиям по результатам испытаний.

- Подготовку публикаций и презентаций по результатам испытаний,
- Поддержание, модернизацию и развитие материальной базы Центра, в том числе физической модели электроэнергетической системы.
- Подготовку и проведение демонстрационных (презентационных) испытательных циклов.
- Подготовку и проведение учебных научно-исследовательских и испытательных работ, предусмотренных образовательными программами НГТУ и реализуемых образовательных программ университета шанхайской организации сотрудничества.
- Проведение учебного практикума по экспериментальным исследованиям в электроэнергетике.
- Проведение специализированного обучения по виду деятельности - экспериментальные исследования и испытания в электроэнергетических системах с выдачей сертификата специалиста-испытателя устройств автоматики электроэнергетических систем.

Структурная схема ЭДМ представлена на рисунке 4.1.

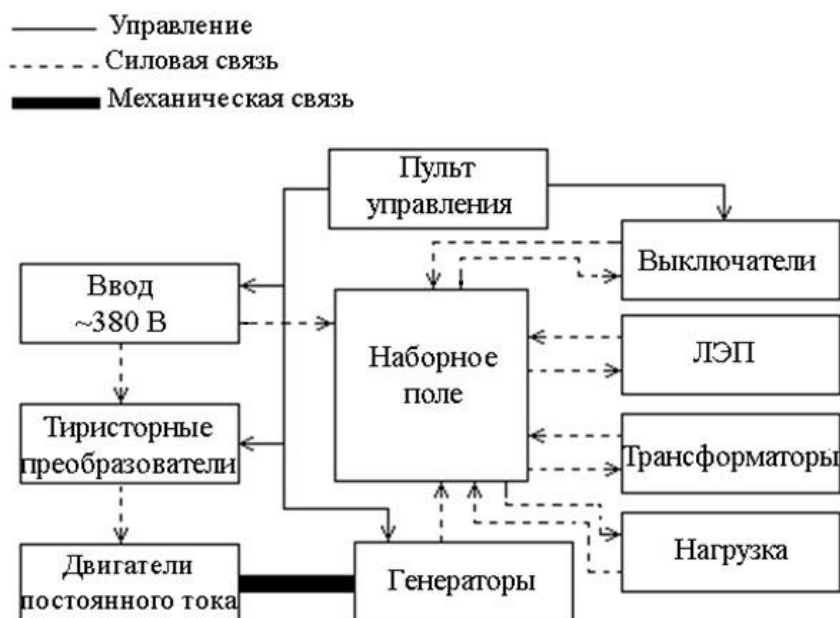


Рисунок 4.1 – Структурная схема электродинамической модели

В реальном времени в ЭДМ моделируются режимы и аварийные ситуации в энергосистемах различного состава и конфигурации с выдачей "живых" осциллограмм и режимных параметров испытуемых образцов в том масштабе, который применим на практике. Это позволяет обеспечивать нормальные условия испытаний, то есть условия испытаний, установленные нормативно-технической документацией (НТД) на испытуемый образец.

В состав модельного комплекса, включающего в себя ЭДМ, также входят средства контроля, измерительные приборы, средства управления, регистрации и обработки режимных параметров моделируемой энергосистемы (рисунок 4.2).

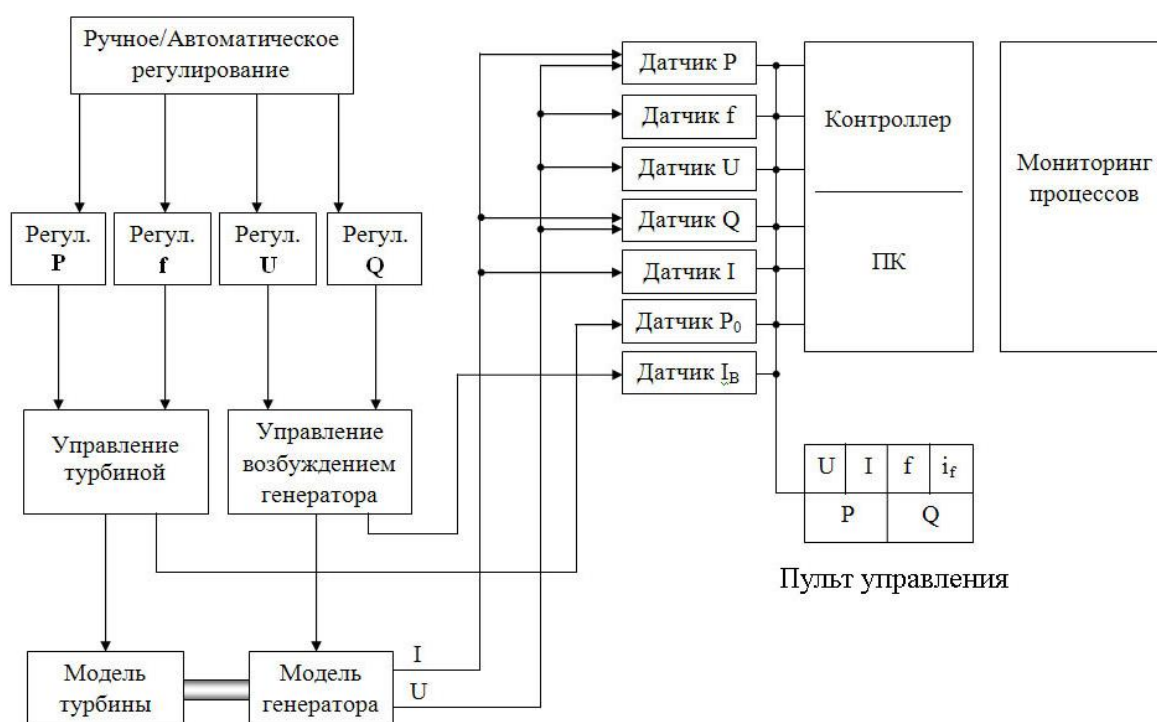


Рисунок 4.2 – Структурная схема средств управления, контроля и регистрации параметров режимов ЭДМ

Испытания на ЭДМ проводятся в соответствии с программой испытаний, в которой определены объект и цели испытаний, испытательная схема, виды, последовательность и объём проводимых экспериментов, порядок, условия, сроки проведения испытаний и ответственные лица.

Идеология построения ЭДМ позволяет собирать для испытаний модель ЭЭС любой сложности и структуры. Ограничением здесь является только количество единиц модельного оборудования ЭДМ. Однако, в большинстве случаев целесообразно ограничиваться типовыми испытательными схемами, которые отлажены на ЭДМ и полностью укомплектованы модельными, измерительным и регистрирующим оборудованием.

К настоящему времени основные исследования на базе ЭДМ НГТУ посвящены вопросам распределенной генерации. Отсюда закономерно следует, что ЭДМ НГТУ должна быть дополнена физической моделью системы накопления энергии. СНЭ может оказать определяющее влияние на развитие исследований в области распределенной генерации.

Перечислим цели оснащения ЭДМ НГТУ физической моделью СНЭ:

1. Проведение экспериментальных исследований на физической модели электроэнергетической системы с традиционными, возобновляемыми источниками энергии и накопителями энергии, подтверждающих работоспособность и эффективность алгоритмов управления и средств автоматизации.
2. Верификация результатов математического моделирования в специализированном программном обеспечении (ПО).
3. Исследование работы преобразователей напряжения совместно с накопителями энергии разных типов. Проведение испытаний различных типов накопителей энергии и различных типов преобразователей.
4. Обучение сотрудников инжиниринговых компаний и сотрудников потенциальных заказчиков особенностям построения СНЭ и ее работы в составе энергосистемы.
5. Проведение презентаций для демонстрации эффективности применения СНЭ для задач управления энергосистемой потенциальным заказчикам.
6. Продвижение тематики СНЭ в учебном процессе НГТУ. Подготовка молодых специалистов соответствующего профиля.
7. Организация совместных научно-практических конференций и семинаров.

8. Формирование перечня тем магистерских и аспирантских диссертаций, полезных для выполнения задач, стоящих перед инжиниринговыми компаниями.

9. Выполнение исследовательских задач аспирантами и магистрантами.

Основные направления экспериментальных исследований СНЭ в составе ЭДМ НГТУ:

1. Выравнивание графиков нагрузки. Автоматическое регулирование частоты и управление потоками активной мощности. Участие в первичном и вторичном регулировании частоты. По мгновенному значению напряжения определяется мгновенное значение частоты в точке подключения СНЭ и рассчитывается величина мощности, которую должна выдавать СНЭ в энергосистему.
2. Компенсация реактивной мощности. Управление реактивной мощностью – одна из основных функций СНЭ. Заменяя традиционные устройства компенсации реактивной мощности, СНЭ способна потреблять и выдавать реактивную мощность, делая это одновременно с другими возложенными на неё функциями.
3. Повышение эффективности электростанций на возобновляемых источниках энергии и их интеграция в традиционные энергосистемы. СНЭ позволяет согласовать стохастический характер генерации электростанций на ВИЭ с потребностями потребителей и оптимизировать управление потоками мощности от возобновляемых источников. При этом есть возможность полностью использовать потенциал ВИЭ.
4. Использование СНЭ для целей противоаварийного управления. СНЭ – инновационный высококомобильный источник/потребитель электроэнергии, обладающий высоким быстродействием, позволяющим использовать его в качестве средства воздействия на режимные параметры для предотвращения, облегчения или ликвидации аварийных ситуаций в энергосистеме, вместо традиционных, «штатных» средств противоаварийной автоматики (ПА). Время реакции СНЭ на аварийную

ситуацию составляет около 5 мс. Учитывая способность СНЭ осуществлять управляющие воздействия с выдачей и потреблением активной и реактивной мощностей, она может быть эффективно использована для актуальных видов ПА, таких как АПНУ, АОСЧ, АОСН, АОПО [29]. Характеристики позволяют применять СНЭ, например, в качестве альтернативы импульсной разгрузке турбины, электрическому торможению, отключению генераторов, отключению нагрузки, автоматической загрузке генераторов и др.

5. Сглаживание резко переменной нагрузки. Потребители большой мощности с резко переменным характером нагрузки негативно влияют на работу отдельного оборудования и энергосистемы в целом. Из-за колебаний нагрузки на питающих линиях электропередачи возрастают потери активной мощности, понижается уровень статической и динамической устойчивости энергосистемы, возрастает вероятность развития низкочастотных колебаний (НЧК) режимных параметров, ухудшается качество электроэнергии в узлах, в которых такая нагрузка составляет значительную долю. В случае, если в узле нагрузки имеется собственная генерация, то при её соизмеримости с резко переменной составляющей графика нагрузки и частоте колебаний мощности в диапазоне 1–3 Гц, может существенно снизиться эффективность автоматических регуляторов напряжения и скорости генераторных агрегатов. Установка СНЭ в узле нагрузки позволяет полностью парировать все нежелательные отклонения режимных параметров и стабилизировать их в заданных пределах.
6. Повышение качества электроэнергии в узлах с резко переменной нагрузкой с помощью СНЭ. СНЭ обеспечивает стабилизацию напряжения в узле с резко переменной нагрузкой. Эту функцию можно рассматривать как дополнительную опцию к управлению активной мощностью, которая не требует значительных капитальных вложений в СНЭ, т. к. силовая часть для регулирования реактивной мощности остаётся без изменений.

Кроме того, актуальной является способность СНЭ выполнять функцию активного фильтра: она «запирает» высшие гармоники в системе электроснабжения приёмного конца электропередачи, не позволяя им попасть в передающую энергосистему.

7. Предотвращение снижения напряжения и лавины напряжения. При снижении напряжения ниже критического значения возможно развитие «лавины напряжения» с полным «погашением» узла нагрузки с асинхронными двигателями. Этого можно избежать, если в пунктах подключения нагрузки использовать СНЭ, управление которыми осуществляется по уровню напряжения в сети. При снижении напряжения ниже аварийно-допустимого уровня на шинах нагрузки включается СНЭ, снижающее как перетоки мощности по линиям электропередачи, так и величину падения напряжения в них.
8. Использование СНЭ в устройствах автоматического ввода резерва (АВР). Для питания ответственных потребителей применяется двухстороннее электроснабжение. В ряде случаев используется секционированная схема питания с применением АВР. Устройства АВР уменьшают время перерыва электроснабжения до минимума, обеспечивая самозапуск асинхронных двигателей. Синхронные двигатели, подключенные к секции, потерявшей питание, за время цикла АВР выпадают из синхронизма. Использование в качестве устройства АВР быстродействующей СНЭ, восстанавливающей электроснабжение через 10–20 мс после его перерыва, позволяет осуществлять питание по секционированной схеме как асинхронной, так и синхронной нагрузки.
9. Замещение «вращающегося» резерва. СНЭ, обладая высоким быстродействием, при условии достаточных мощности и энергоёмкости, более всех других известных вариантов резервирования мощности способна выполнять функции «вращающегося» резерва. Для этого можно использовать специализированный накопитель энергии, который в режиме выдачи мощности из режима хранения (режим ожидания без

энергообмена с системой) переходит только при необходимости введения резерва в действие. В тех случаях, когда СНЭ выполняет другие задачи, её также можно привлечь для «вращающегося» резерва, если на момент востребования в накопителе имеется достаточный запас энергии.

10. Защита генерирующего оборудования от резких изменений нагрузки. Быстродействующие СНЭ за счёт сглаживания фронтов импульсов нагрузки способны кардинально защитить генераторные агрегаты от резких и глубоких бросков мощности, предотвращая повреждение или аварийное отключение генераторных агрегатов.
11. Краткосрочное резервирование ответственных потребителей.
12. Применение СНЭ для подавления низкочастотных колебаний режимных параметров. СНЭ позволяет подавлять НЧК в момент их возникновения за счёт управления перетоками активной и реактивной мощностью, удерживая амплитуды НЧК в приемлемых и неопасных диапазонах.
13. Демпфирование нерегулярных колебаний активной мощности при помощи СНЭ. При проектировании и эксплуатации энергосистем необходимо ограничивать перетоки мощности по сечениям, исходя из условия обеспечения запаса статической устойчивости. Нерегулярные колебания перетока мощности между двумя частями энергообъединения появляются в результате несоответствия между генерацией и потреблением в текущем режиме и имеют случайный характер. Чем выше амплитуда нерегулярных колебаний, тем ниже расчётный коэффициент запаса статической устойчивости.
14. Снижение амплитуды нерегулярных колебаний при помощи СНЭ позволяет увеличить допустимый переток по сечению.
15. Увеличение пропускной способности (по энергии) электропередач. Установка СНЭ на приёмном конце электропередачи обеспечивает перераспределение передаваемой энергии во времени. Тем самым при необходимости можно загрузить линию до возможного максимума электропередачи по мощности в течение суток. Таким образом, учитывая

неравномерность графика нагрузки, увеличивается количество энергии, передаваемой по линии электропередачи без строительства дополнительной линии.

16. Повышение эффективности гибридных электростанций со СНЭ. Применение СНЭ в гибридных электростанциях позволяет повысить их технико-экономическую эффективность. Это связано с тем, что появляется возможность оптимизировать потоки мощности от разного рода источников энергии. При избытке возобновляемой генерации СНЭ сохранит невостребованные объемы энергии.

17. Применение СНЭ в SmartGrid. СНЭ органично встраиваются в архитектуру SmartGrid, являясь одним из её центральных элементов, повышая надёжность и технико-экономические показатели.

4.2 Технические требования и структура модели СНЭ в составе ЭДМ НГТУ

После определения задач, которые будут решаться с помощью СНЭ, необходимо произвести расчет ее главных параметров – мощности и энергоёмкости. Для этого рассмотрим основные параметры нагрузочного и генерирующего оборудования ЭДМ НГТУ.

В состав ЭДМ входит, как специальное модельное оборудование, предназначенное для целей физического моделирования, так и серийное общепромышленного назначения.

- Модельные синхронные машины (с первичными приводными двигателями постоянного тока) типа МТ-5-1500 с номинальной мощностью 5 кВА - 2 шт., МК-3-1500 с номинальной мощностью 3 кВА - 2 шт., сконструированные с учетом основных критериев подобия). Каждый генератор МТ-5 укомплектован двумя сменными роторами явнополюсным и неявнополюсным, а также специальными съёмными

стальными дисками для изменения механической постоянной времени. Машины МК-3 конструктивно выполнены как синхронные компенсаторы.

- Серийные синхронные генераторы общепромышленного назначения (с первичными, приводными двигателями постоянного тока) МСА 72/4А с номинальной мощностью 15 кВА - 1 шт. и ЕСС-52-4Щ с номинальной мощностью 6,23 кВА - 1 шт., используемые для целей физического моделирования.
- статическая нагрузка (активная – около 4 кВт и осветительная - 1,5 кВт);
- двигательная нагрузка (асинхронная - 2,37 кВт и синхронная - 5 кВт).

Анализ параметров нагрузки и установленной мощности ЭДМ, с учетом поставленных задач перед физической моделью СНЭ, позволяет выдвинуть требования к общим параметрам накопителя. Общие параметры СНЭ представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Общие параметры физической модели СНЭ в составе ЭДМ

Параметр	Значение
Номинальная полная мощность, кВ·А	4,0
Номинальная активная мощность, кВ·А	3,0
Энергоемкость номинальная, кВтч	3,0
Энергоемкость обменная, кВтч	0,6

Выбор значений параметров СНЭ сделан из следующих соображений. Автономные энергосистемы малой мощности, как правило, имеют нагрузку соизмеримую с установленной мощностью большего из генерирующих агрегатов. Для имитации свойств автономной энергосистемы в работе должна оставаться одна из модельных машин мощностью 5 кВА. Для сглаживания резких сбросов и набросов нагрузки накопитель должен обладать мощностью соответствующей примерно максимуму активной нагрузки (около 4 кВт).

5 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЭ

Особое значение для разработки новых алгоритмов управления, апробации тех или иных режимов работы СНЭ в энергосистемах имеет математическое моделирование. Замена СНЭ на соответствующую математическую модель позволяет провести интеграцию с другими, уже существующими и хорошо изученными моделями объектов электроэнергетики.

Созданию математической модели СНЭ посвящено множество работ [30-38]. В некоторых из них [30-32] СНЭ представлена как динамическое звено системы автоматического регулирования (САР), в других идет упор на подробное моделирование типов накопителей [33-38].

В то же время анализ стандартных библиотек программно-вычислительных комплексов PowerFactory (DIgSILENT, Германия), MATLAB Simulink (MathWorks, США), ETAP (ETAP, США), EUROSTAG (Tractebel, EDF, Франция, Бельгия) показывает, что математической модели СНЭ в них, как единого устройства, не существует.

Дальнейшее исследование в настоящей работе строилось на основе модели СНЭ представленная авторами в [39]. Рассматриваемая модель разработана в ПВК DIgSILENT PowerFactory и усовершенствована относительно модели, описанной авторами в [40-42]. В процессе заряда и разряда учитывается коэффициент полезного действия СНЭ. Кроме того, учитываются саморазряд накопителей энергии и зависимость располагаемой мощности СНЭ от уровня заряда. Соответствующая зависимость задаётся пользователем, что позволяет использовать модель для имитации СНЭ с различными типами накопителей энергии.

Основное назначение расчётов с использованием модели – оценка правильности выбора параметров СНЭ, апробация алгоритмов управления СНЭ, оценка эффективности работы СНЭ в различных условиях. Модель позволяет рассчитывать переходные процессы с учётом управляемого обмена

активной и реактивной мощностью СНЭ и энергосистемы при основных ограничениях, накладываемых характеристиками элементов СНЭ.

5.1 Описание математической модели СНЭ

Модель СНЭ имеет 2 основные структуры, переключение между которыми осуществляется пользователем в зависимости от задач исследования:

1. Структура для расчёта электромеханических переходных процессов (по действующим значениям);
2. Структура для расчёта электромагнитных переходных процессов (по мгновенным значениям).

В основе структуры модели СНЭ для расчёта электромеханических переходных процессов (рисунок 5.1) с целью снижения требований к вычислительным ресурсам и сокращения времени расчета для моделирования работы преобразователя используется управляемый источник мощности (блок статического генератора). Также в структурную схему модели входят: блок параметров СНЭ; блоки моделирования динамических процессов в СНЭ (блок расчёта уровня заряда, блок контроля уровня заряда, блок ограничения активной мощности, блок ограничения полной мощности, блок задержки); блок системы управления СНЭ.

В блоке параметров задаются основные параметры СНЭ. Блоки, моделирующие функционирование подсистем СНЭ во времени, представляют собой наборы элементов и функций, позволяющих источнику мощности выдавать или потреблять энергию с учётом особенностей СНЭ. В блок системы управления закладываются алгоритмы, реализующие заданные режимы функционирования СНЭ.

Структура модели СНЭ для расчёта электромагнитных переходных процессов отличается от описанной выше тем, что управляемый источник мощности заменяется на транзисторный преобразователь, управляемый посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с использованием

теории мгновенной мощности Хирофуми Акаги [27]. Кроме того, добавляется блок фазовой автоподстройки частоты, осуществляющий синхронизацию с энергосистемой.

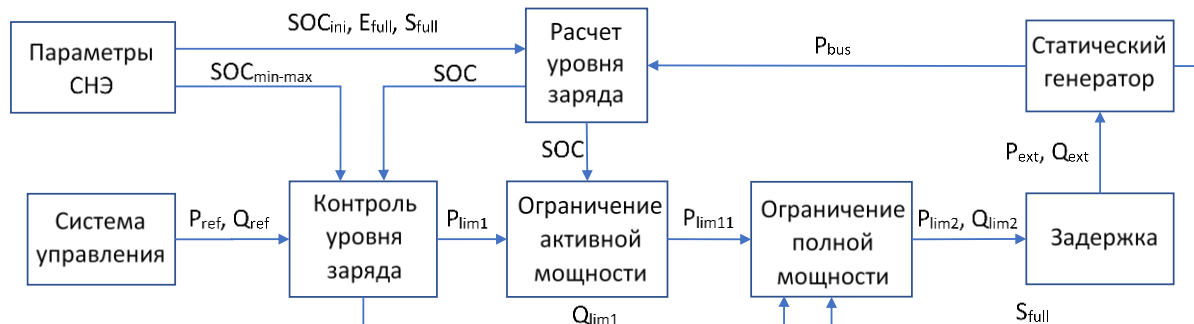


Рисунок 5.1 – Структура модели СНЭ для расчёта электромеханических переходных процессов: E_{full} – номинальная энергоемкость СНЭ, МВт·ч; S_{full} – номинальная мощность СНЭ, МВА; SOC_{ini} – начальный уровень заряда СНЭ, о.е.; $SOC_{min-max}$ – ограничения по максимальному и минимальному уровню заряда СНЭ, о.е.; SOC – текущий уровень заряда СНЭ, о.е.; P_{ref} и Q_{ref} – сигналы требуемых мощностей, МВт и Мвар; P_{lim1} и Q_{lim1} – желаемые мощности с учётом ограничения по уровню заряда, МВт и Мвар; P_{lim11} – желаемая активная мощность с учетом ограничений по уровню заряда и располагаемой мощности, МВт; P_{lim2} и Q_{lim2} – желаемые мощности с учетом ограничений по уровню заряда, располагаемой мощности и полной мощности, МВт и Мвар; P_{ext} и Q_{ext} – сигналы, задающие выдаваемую или потребляемую мощность СНЭ с учётом ограничений, МВт и Мвар; P_{bus} – активная мощность, выдаваемая или потребляемая СНЭ, МВт.

5.2 Верификация математической модели СНЭ по результатам натурального эксперимента

Первичная оценка достоверности математической модели СНЭ проводилась путём сравнения результатов расчёта (рисунки 5.2, 5.4) с результатами натурального эксперимента (рисунки 5.3, 5.5), проведённого в Новосибирске в автономной энергосистеме, включающей СНЭ мощностью 100 кВА и энергоемкостью 153 кВт·ч с аккумуляторами LT-LYP300AH, дизель-генераторную установку ЭДД-100 мощностью 100 кВт и коммутируемую нагрузку максимальной мощностью 89 кВт [14].

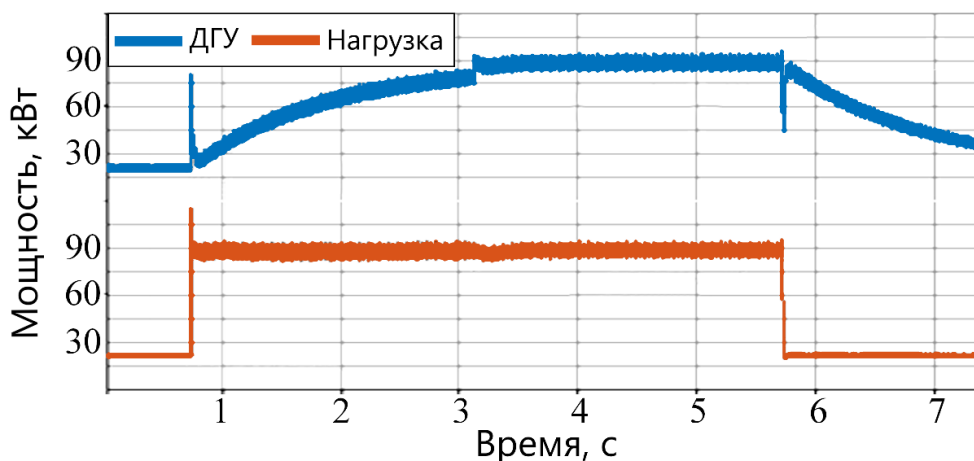


Рисунок 5.2 – Эксперимент: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ДГУ

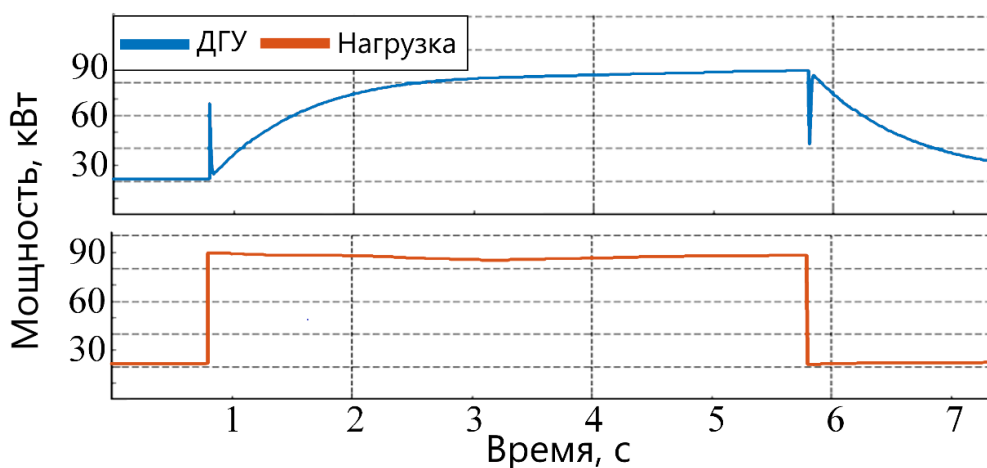


Рисунок 5.3 – Расчет: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ДГУ

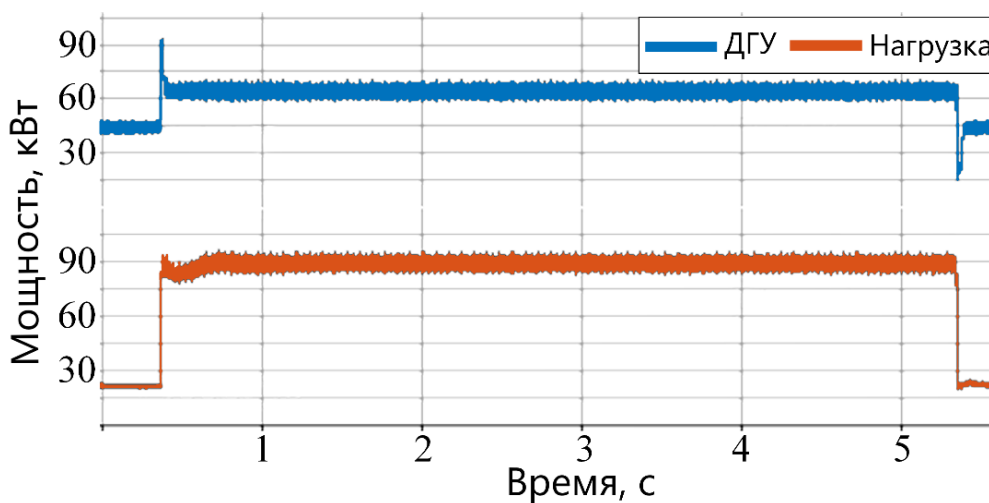


Рисунок 5.4 – Эксперимент: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ДГУ

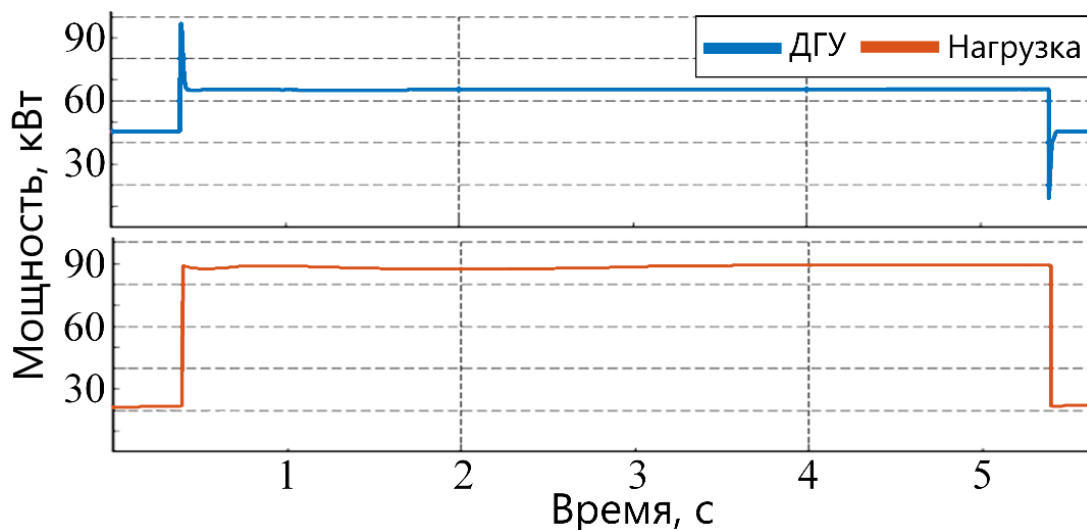


Рисунок 5.5 – Расчет: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ДГУ

Сравнение расчётов на модели с натурными испытаниями показало, что разработанная авторами модель СНЭ даёт качественное и количественное соответствие с реальной СНЭ.

Отдельное внимание заслуживает процесс оценки точности и адекватности математической модели СНЭ, путем сравнения результатов расчета и изложенных ранее результатов испытаний СНЭ-10-1200-400.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5.6.

В составе установки:

- две ГПУ GmbH MWM TCG 2020 V12K мощностью по 1125 кВт каждая;
- силовые трансформаторы и выключатели;
- секционированная активная нагрузка мощностью 1200 кВт;
- система накопления энергии СНЭ-10-1200-400 мощностью 1200 кВА и энергоёмкостью 400 кВт·ч производства ООО «Системы накопления энергии»;
- контрольно-измерительное и регистрирующее оборудование.

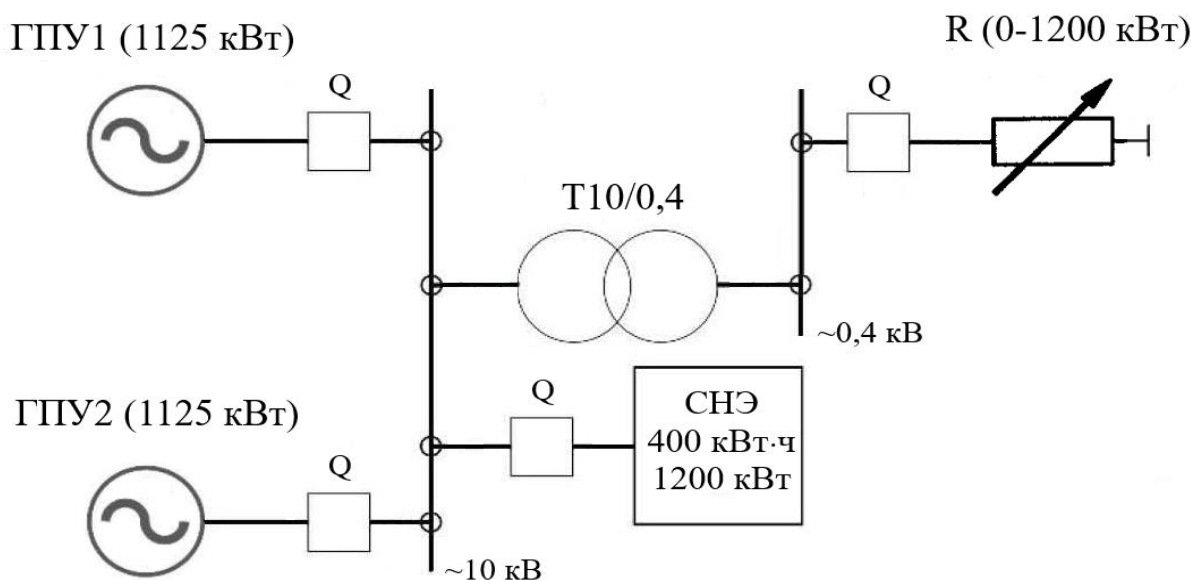


Рисунок 5.6 – Принципиальная схема испытательной экспериментальной установки

Работоспособность СНЭ испытывалась в двух режимах:

- Ограничение скорости изменения мощности ГПУ во время набросов и сбросов мощности;
- Ограничение максимальной и минимальной мощности ГПУ в разных нагрузочных циклах при различных уставках.

Для моделирования СНЭ используется разработанная авторами модель СНЭ, описанная выше. В модель СНЭ заложены параметры накопителей энергии, соответствующие литий-железо-фосфатным аккумуляторам. В системе управления модели СНЭ реализованы те же алгоритмы, что и в системе управления СНЭ-10-1200-400.

Использована модель ГПУ с автоматическим регулятором скорости (АРС), описанная в [43]. Параметры АРС подобраны таким образом, чтобы при наборе мощности график изменения скорости вращения был максимально близок к графику, полученному при заводских испытаниях ГПУ GmbH MWM TCG 2020 V12K. В качестве автоматического регулятора возбуждения (АРВ) использован типовой регулятор, имеющийся в библиотеке PowerFactory: 1968 IEEE Type 1 Excitation System.

Модель энергосистемы имеет в своём составе элемент изменяемой активной нагрузки. График нагрузки задан в соответствии с суммарным графиком мощности, потребляемой нагрузочными модулями на испытаниях СНЭ-10-1200-400.

Первый опыт, при котором СНЭ работала по алгоритму ограничения скорости изменения мощности нагрузки на ГПУ (рисунок 5.7), проводился при повторно-кратковременном характере изменения активной нагрузки: длительность цикла 10 с, диапазон изменения мощности от 0 до 1200 кВт. Уставка алгоритма СНЭ: скорость изменения мощности ГПУ ≤ 15 кВт/с. При превышении заданной уставки СНЭ обеспечивала плавное изменение мощности ГПУ при резких изменениях мощности нагрузки. Время реакции СНЭ составляло не более 20 мс.

Визуальное сравнение экспериментальных осциллограмм (рисунок 5.7, 5.9) с расчетными (рисунок 5.8, 5.10) показало, что разработанная модель СНЭ обеспечивает качественное соответствие реальной СНЭ. Полученная относительная погрешность расчета составляет 0,2% и определялась, как отношение разности максимального отклонения частоты эксперимента и модели к частоте в установившемся режиме.

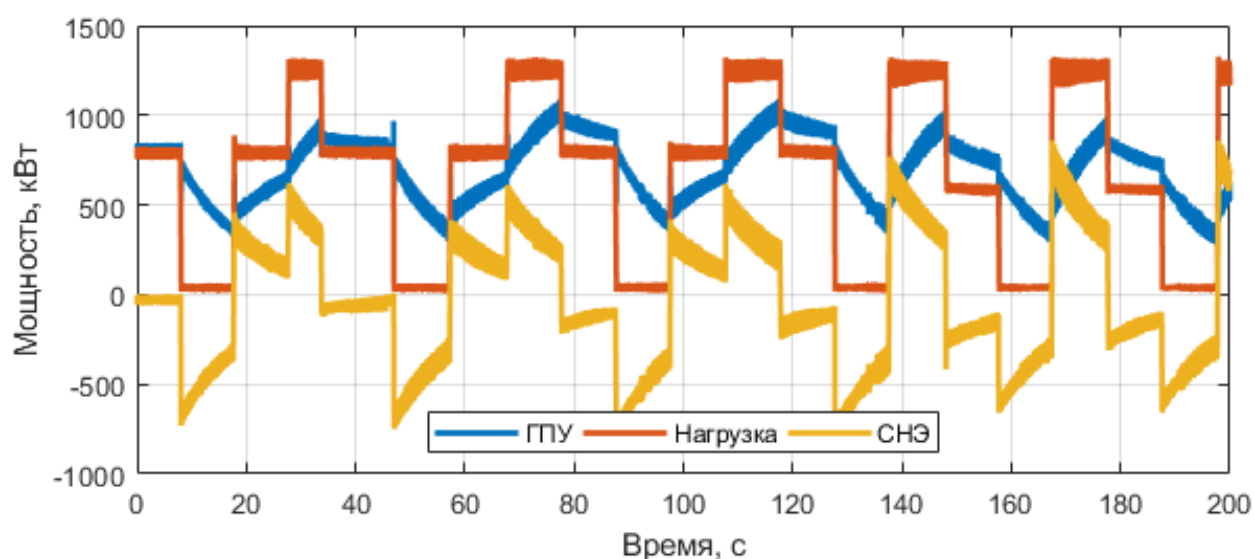


Рисунок 5.7 – Эксперимент: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ГПУ с уставкой 15 кВт/с

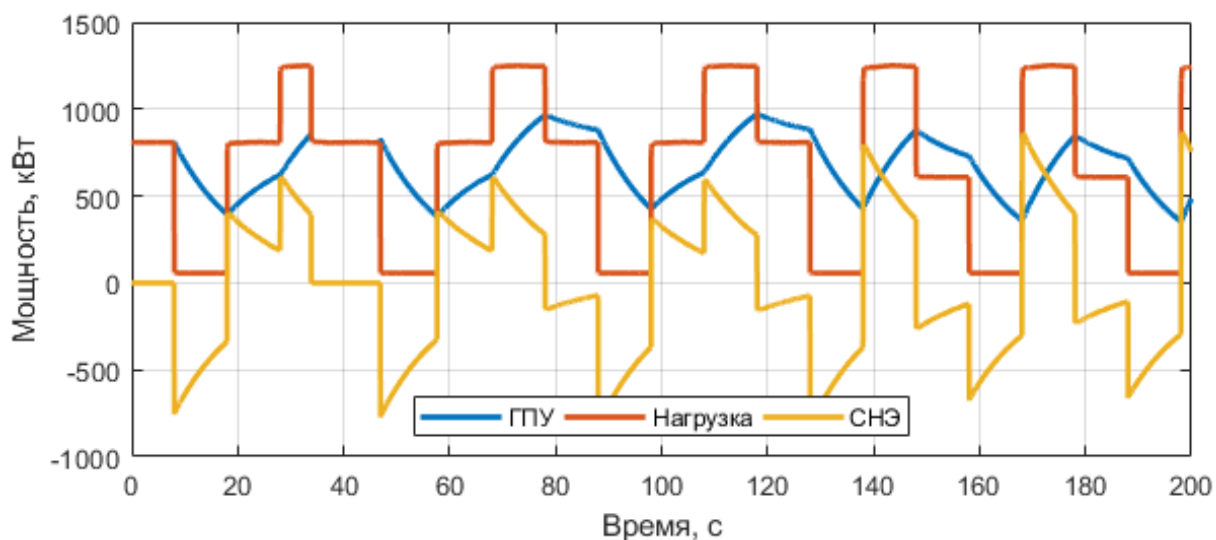


Рисунок 5.8 – Расчет: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ГПУ с уставкой 15 кВт/с

Экспериментальная осциллограмма при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт представлена на рисунке 5.9. Результаты расчета на модели представлены на рисунке 5.10.

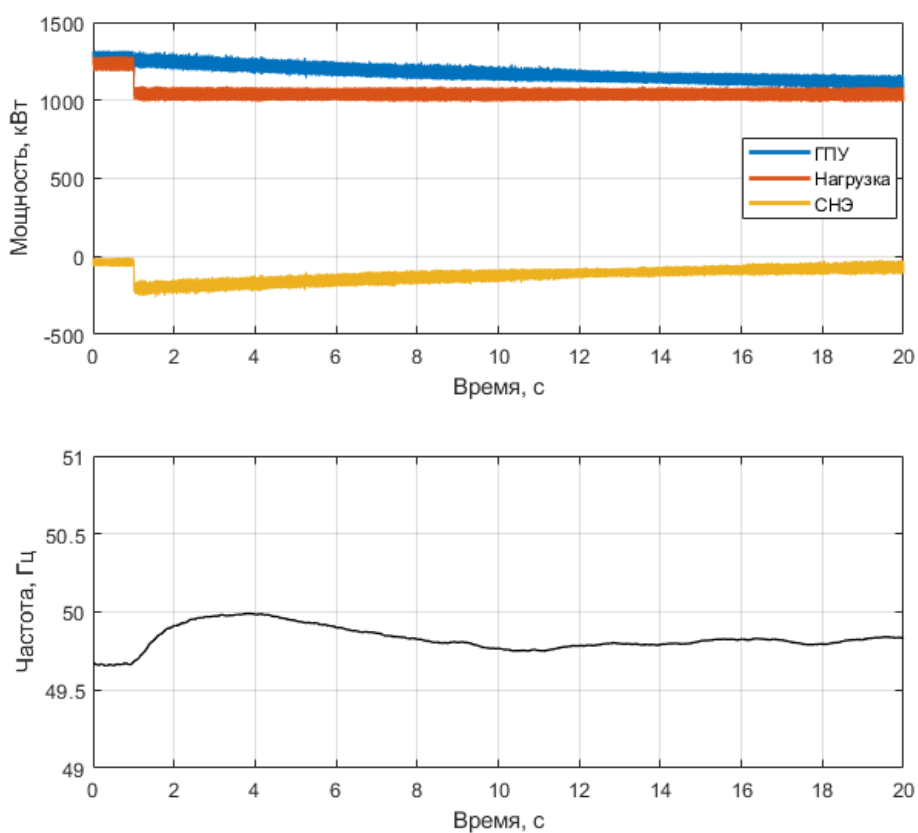


Рисунок 5.9 – Эксперимент: переходный процесс при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

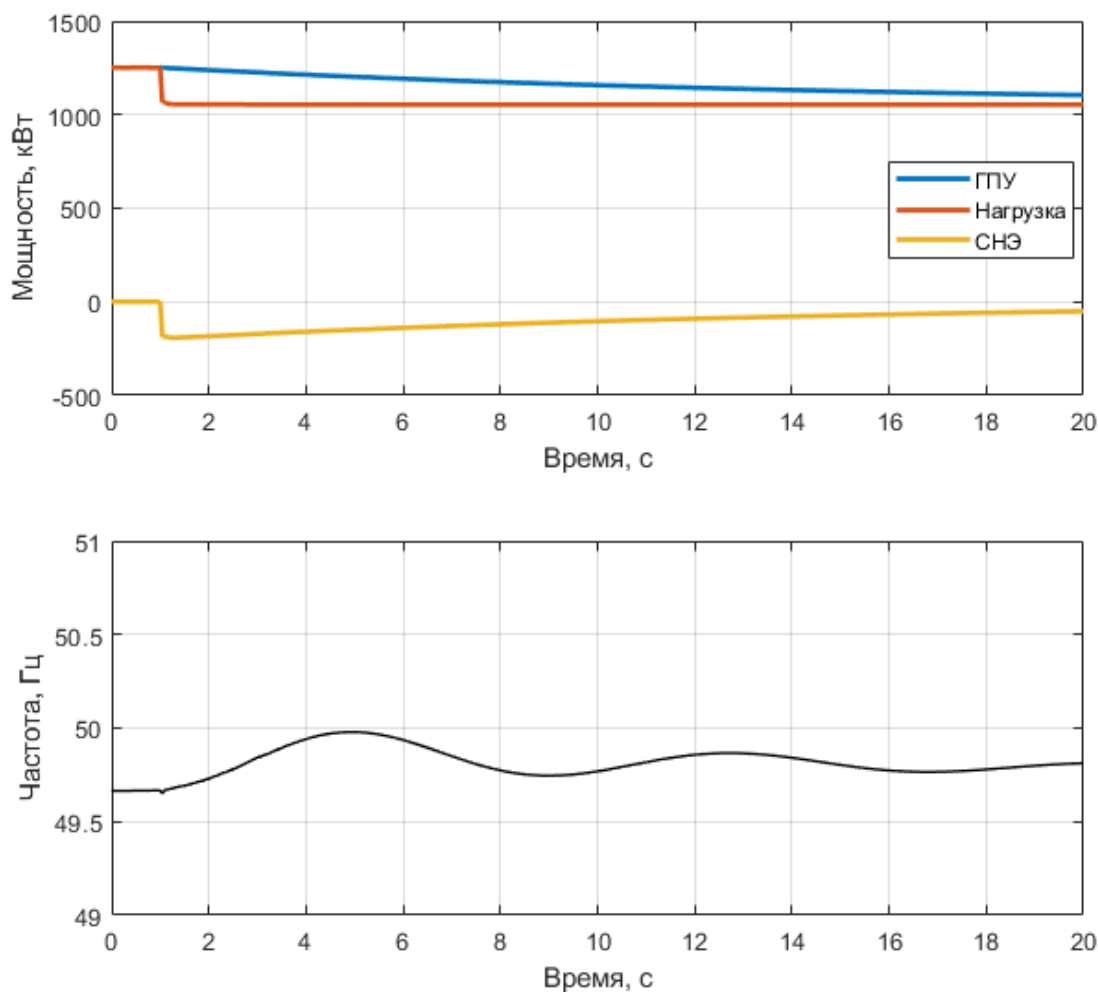


Рисунок 5.10 – Расчет: переходный процесс при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

В ходе второго опыта СНЭ работала на ограничение суммарной максимальной и минимальной мощности двух ГПУ (нижняя уставка – 900 кВт, верхняя – 1100 кВт). При выходе мощности нагрузки за пределы указанных значений разница между уставкой и фактической нагрузкой компенсировалась за счёт СНЭ. На интервале от 0 до 250 секунд мощность нагрузки изменялась от 800 до 1200 кВт, далее - от 800 до 1000 кВт (рисунок 5.11).

Сравнение расчета на модели СНЭ (рисунок 5.12) с экспериментальными осциллограммами (рисунок 5.11) в режиме ограничения минимума и максимума мощности ГПУ показало достаточное для инженерных исследований качественное и количественное совпадение результатов с относительной погрешностью 0,8%.

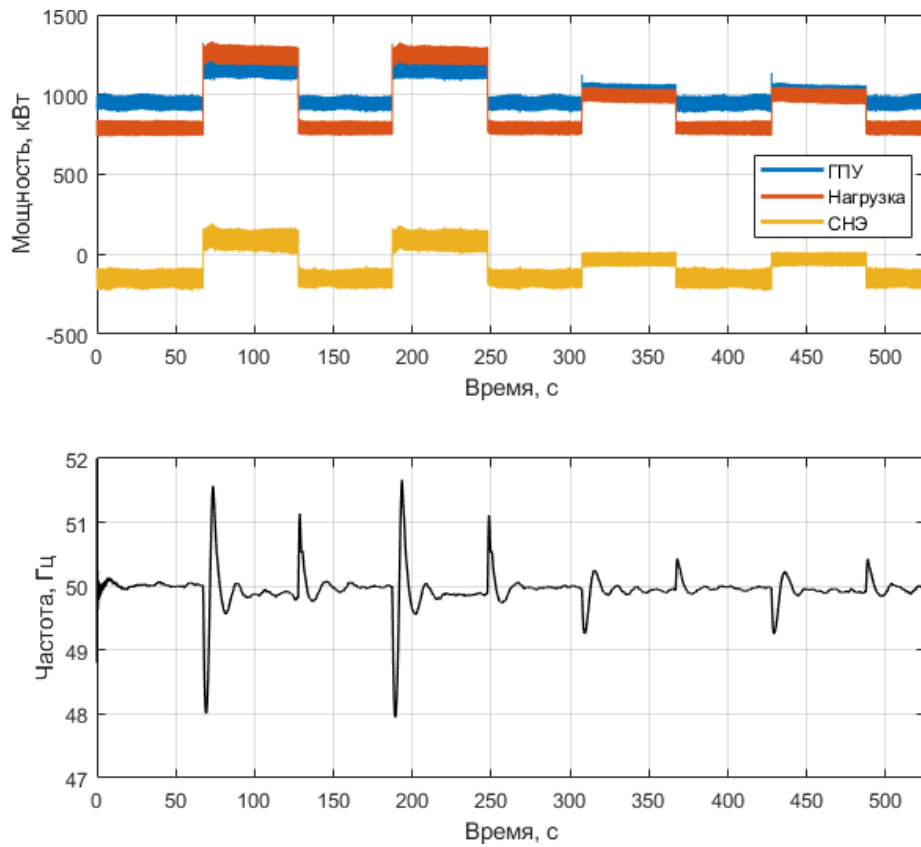


Рисунок 5.11 – Эксперимент: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ГПУ

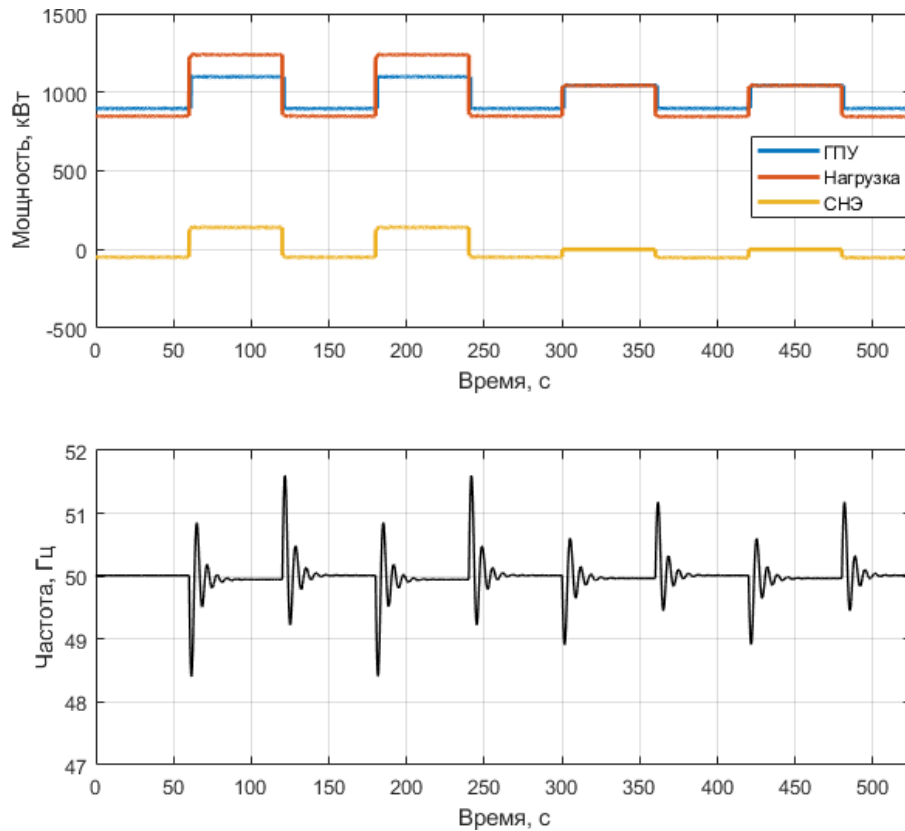


Рисунок 5.12 – Расчет: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ГПУ

6 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНЭ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ДГУ И ВИЭ

Разработка и апробация алгоритма управления СНЭ для регулирования частоты в энергосистеме с традиционными и возобновляемыми источниками энергии начинается с создания математической модели энергосистемы.

Состав математической модели энергосистемы в ППК MATLAB/Simulink:

- Гибридная СНЭ с подсистемой накопления на базе литий-ионных аккумуляторных батарей и суперконденсаторов. Аккумуляторы типа LT-LYP300AH мощностью 460 кВА и энергоёмкостью 153 кВт·ч [26] с преобразователем мощностью 100 кВА. Суперконденсаторы мощностью 400 кВА, и энергоёмкостью 0,85 кВт·ч с преобразователем мощностью 100 кВА.
- Дизель-генераторная установка с двигателем ЭДД-100 мощностью 100 кВт (125 кВА) и генератором ГС-100-400 [44].
- Солнечная станция мощностью 150 кВт.
- Коммутируемая нагрузка мощностью 89 кВт.

Используемая математическая модель СНЭ и её верификация посредством сравнения с результатами натурных испытаний описаны выше.

На рисунке 6.1 представлена модель АРС ДГУ [32].

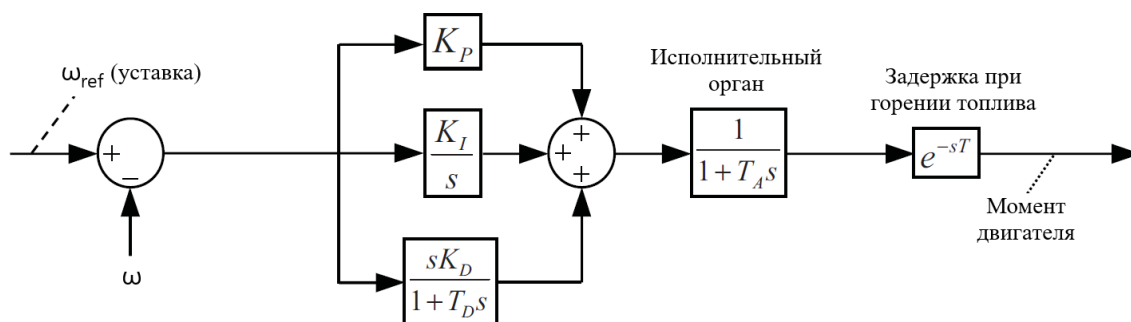


Рисунок 6.1 – Структура АРС дизельного двигателя

Динамические свойства дизельного двигателя моделировались путем введения в модель звена запаздывания e^{-Ts} с переменной задержкой T , характеризующего конечную скорость горения топлива в камере сгорания двигателя. Временная задержка определяется из выражения:

$$T = \frac{60S}{2Qn} + \frac{60}{4n},$$

где S – количество тактов в рабочем цикле двигателя; Q – количество цилиндров; n – скорость вращения вала.

Для двигателя ЭДД-100: $S = 4$, $Q = 6$. Таким образом, значение временной задержки $T = 0,012$ с при $n = 3000$ об/мин.

Механическая инерционная постоянная времени ротора генератора T_J определялась следующим образом:

$$T_J = \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}\right)^2}{S_{\text{ном}}} = 1,4 \cdot \frac{\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60}\right)^2}{100000} = 1,4 \text{ с},$$

где GD^2 – маховой момент генератора, кг·м²; n – скорость вращения ротора, об/мин; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность генератора, Вт.

Для моделирования автоматического регулятора возбуждения (АРВ) использовался блок Excitation System из библиотеки Simscape со стандартными значениями параметров.

Значения коэффициентов звеньев ПИД-регулятора АРС ДГУ подобраны таким образом, чтобы результаты моделирования повторяли результаты эксперимента при набросе/сбросе нагрузки описанного в [10]. Также модель АРС дизельного двигателя дополнена положением исполнительного органа (дрессельной заслонки). В итоге получена модель АРС, показанная на рисунке 6.2.

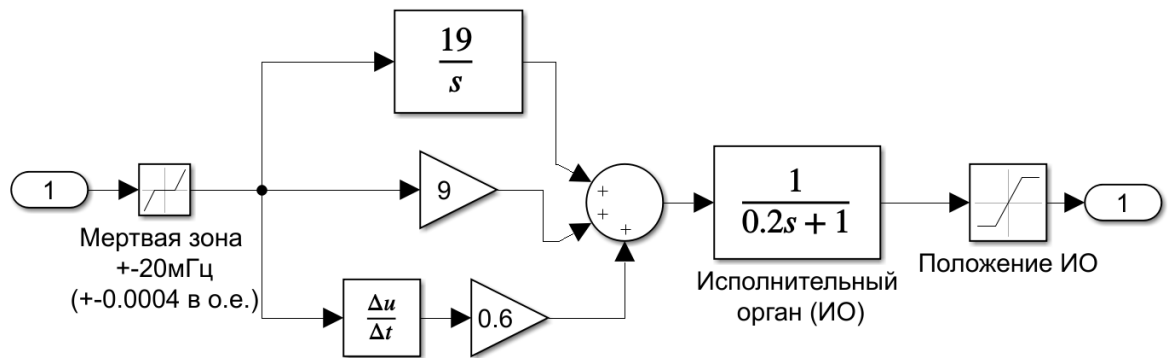


Рисунок 6.2 - Модель APC в Simulink

Модель ДГУ с APC и APB показана на рисунке 6.3.

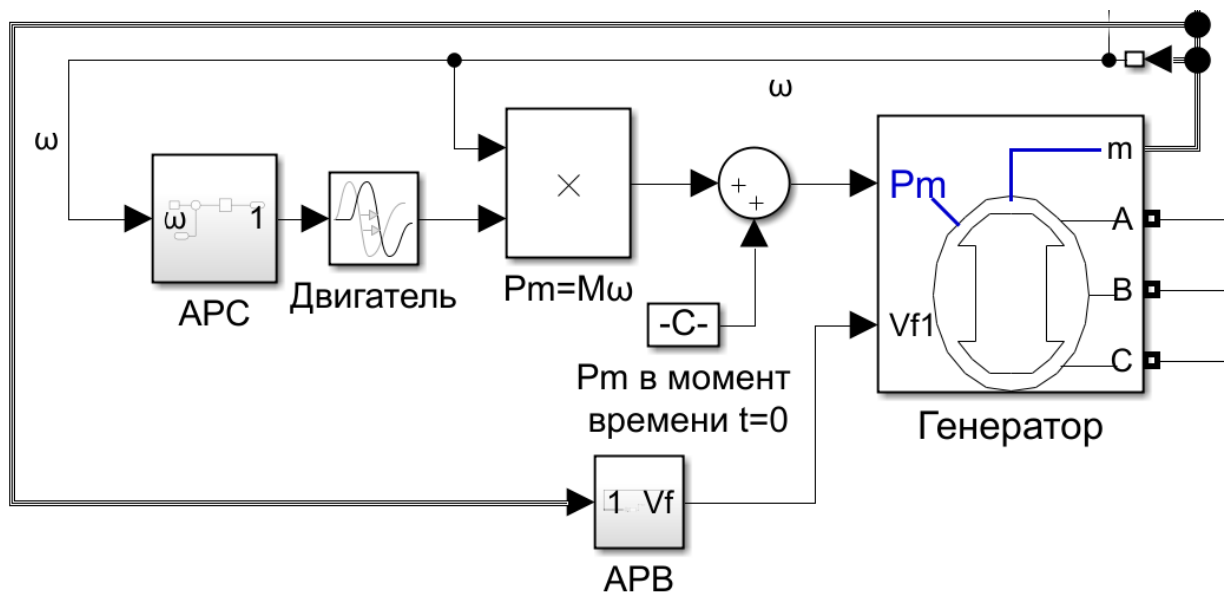


Рисунок 6.3 – Модель ДГУ с APC и APB

Для верификации модели ДГУ проведен расчет по эксперименту, описанному в [10]. В эксперименте [10] отклонение частоты при набросе/сбросе 75 % полной нагрузки (67,4 кВт от 89 кВт) составляло 3,8 и 3,3 Гц соответственно (рисунок 6.4).

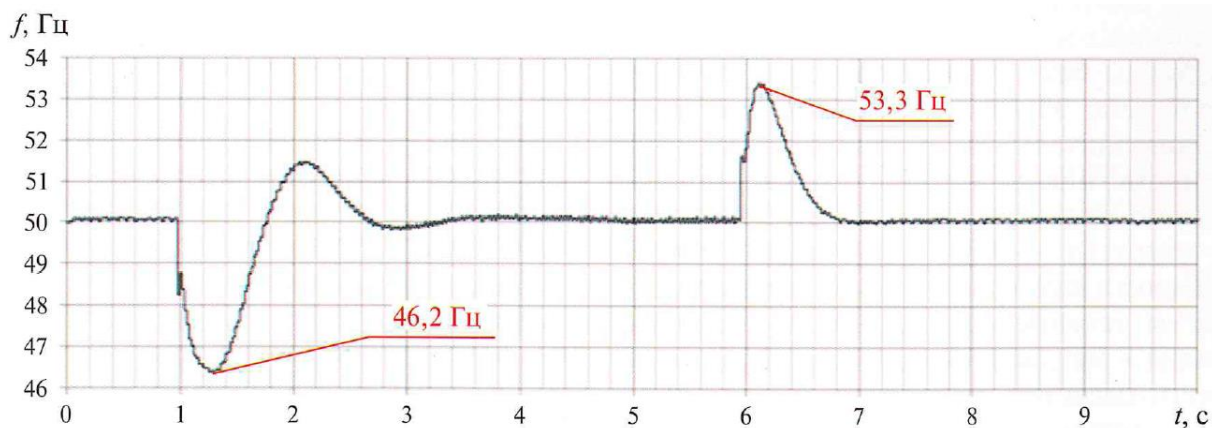


Рисунок 6.4 – Эксперимент: отклонение частоты при набросе/сбросе 75 % нагрузки (67,4 кВт) на ДГУ без СНЭ

Расчёт на модели ДГУ в ПВК Simulink (рисунок 6.5) даёт количественное и качественное совпадение с результатами эксперимента.

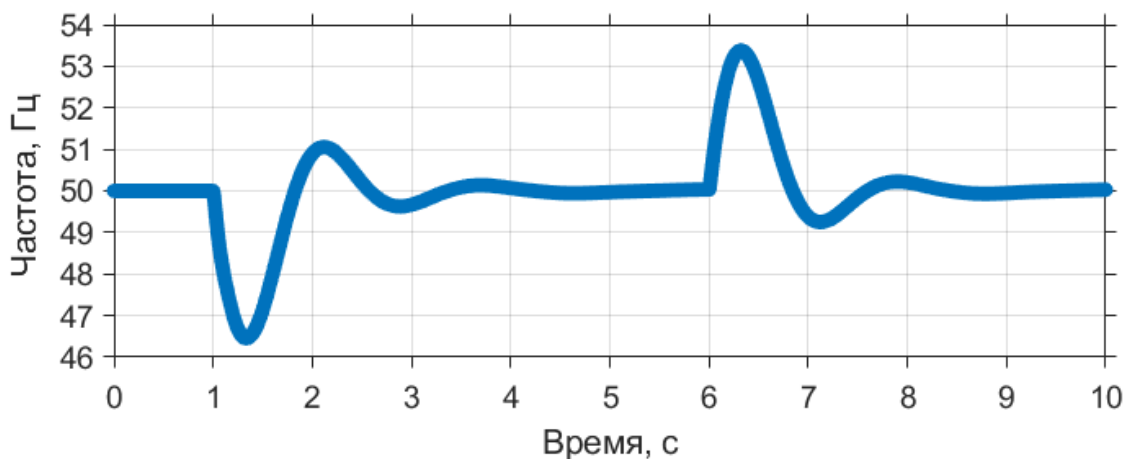


Рисунок 6.5 – Расчет: отклонение частоты при набросе/сбросе 75 % нагрузки (67,4 кВт) на ДГУ без СНЭ

Далее, добавлена модель солнечной станции. Входными параметрами модели солнечной станции являются мощность инсоляции (150 Вт/м^2) и площадь солнечных панелей (1000 м^2).

Далее, в модель энергосистемы добавлена математическая модель СНЭ и нагрузки. В результате получена итоговая модель энергосистемы (рисунок 6.6).

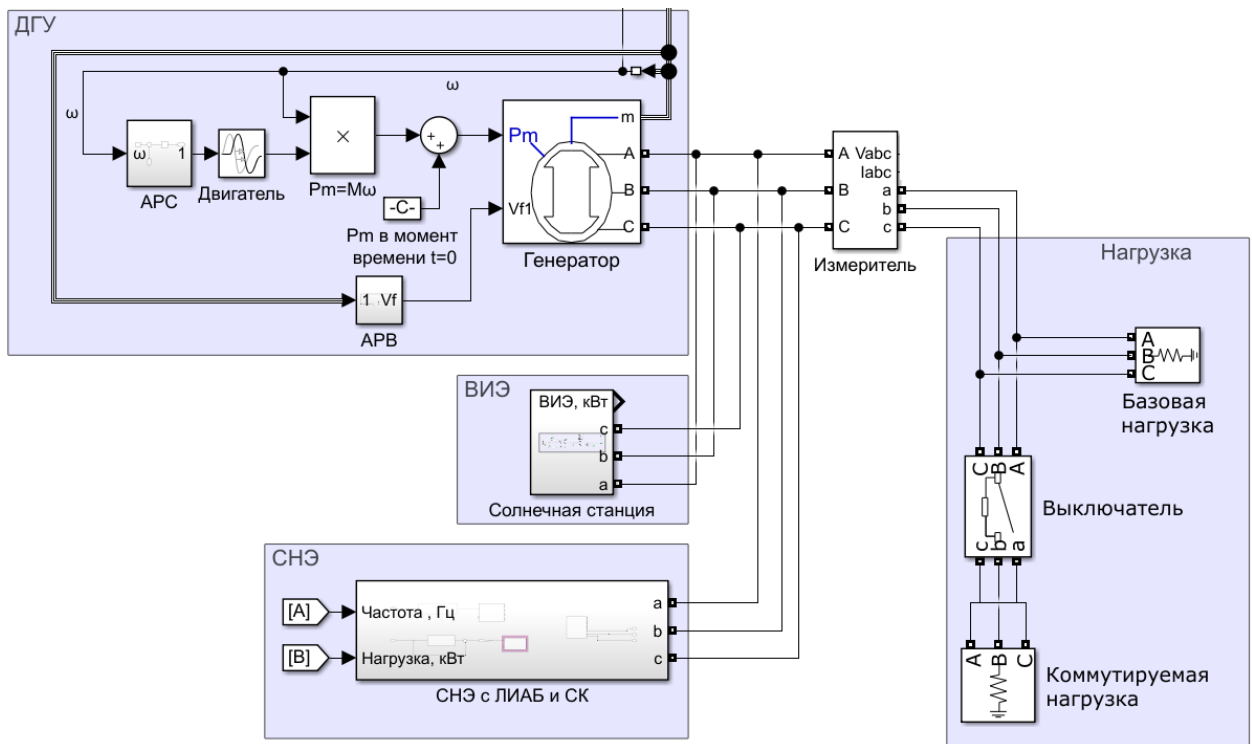


Рисунок 6.6 – Модель энергосистемы с ДГУ, ВИЭ, СНЭ и нагрузкой

Таким образом, разработана математическая модель автономной энергосистемы с традиционными и возобновляемыми источниками энергии с системой накопления энергии, которую можно использовать для отработки алгоритмов управления СНЭ для задач регулирования частоты и для других исследований.

6.1 Разработка алгоритма управления СНЭ для регулирования частоты в автономной энергосистеме

В автономных энергосистемах на базе ДГУ или ГПУ штатный автоматический регулятор скорости (АРС) способен обеспечивать поддержание частоты в соответствии с требованиями ГОСТ 32144–2013 частоты во всём рабочем диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до номинального значения, в том числе при резко переменном характере нагрузки [45]. Исключением, приводящим к недопустимым отклонениям частоты, являются: аварийные режимы энергосистемы и режимы, в которых при внезапном увеличении нагрузки количество включённых генераторных

агрегатов оказывается недостаточным для её покрытия [9,10]. Наиболее неблагоприятно складывается ситуация в энергосистемах с большой долей ВИЭ, когда выработка электроэнергии резко уменьшается по природным причинам, а резерв мощности на традиционных электростанциях оказывается недостаточным для покрытия нагрузки. Недопустимые отклонения частоты могут также происходить на многоагрегатных автономных электростанциях, где для экономии дорогостоящего топлива число работающих генераторных агрегатов согласуется с графиком нагрузки энергосистемы, чтобы обеспечить их оптимальную загрузку. При такой организации работы электростанции возрастает вероятность того, что при резких набросах нагрузки возникает дефицит генерирующей мощности и ресурса регулирования. Обеспечить соответствие частоты требованиям ГОСТ 32144–2013 в таких случаях невозможно без отключения потребителей, что связано с неизбежным ущербом, особенно на нефтегазодобывающих предприятиях. Альтернативой отключению нагрузки является привлечение к управлению частотой и активной мощностью быстродействующих СНЭ [46-54].

Для рассматриваемой энергосистемы (рисунок 6.6) предложены два алгоритма управления СНЭ для регулирования частоты. Алгоритмы управления СНЭ для регулирования частоты должны минимизировать отклонение частоты во всех режимах работы автономной энергосистемы.

Преимущества от минимизации отклонения частоты могут быть получены из-за ряда особенностей электрооборудования электростанции и потребителя.

Работа при пониженной частоте приводит к:

- ускоренному износу рабочих лопаток турбины и других ее деталей [55];
- негативному влиянию на работу механизмов собственных нужд электростанции [47,55];

- износу оборудования, содержащего элементы со сталью: электродвигатели, трансформаторы, реакторы со стальным магнитопроводом [56];
- снижению производительности агрегатов потребителей электроэнергии [55,56].

Для апробации алгоритмов управления СНЭ в математической модели энергосистемы временно выведена из работы СЭС. Небаланс активной мощности достигался за счет подключения и отключения активной нагрузки.

Алгоритм № 1 управления СНЭ для регулирования частоты в автономной энергосистеме выполняет сглаживание набросов/сбросов нагрузки. Структурная схема регулятора представлена на рисунке 6.7.

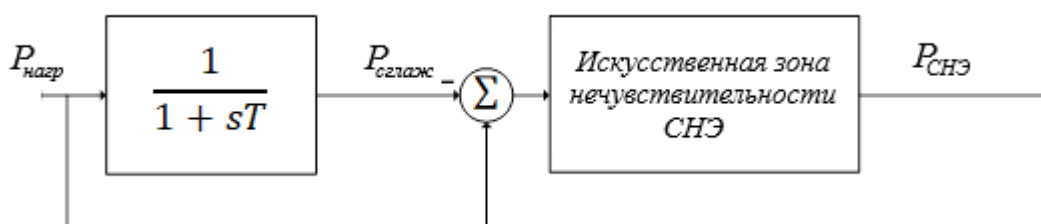


Рисунок 6.7 – Структурная схема алгоритма управления №1

На вход сумматора подаются сигнал мощности нагрузки. Далее этот сигнал дублируется, по одному из каналов управления. Один из сигналов проходит через аperiodическое звено первого порядка. На выходе аperiodического звена получается сигнал сглаженной нагрузки. При сложении сигнала нагрузки и сигнала сглаженной нагрузки получается сигнал требуемой мощности от СНЭ. Этот сигнал может быть как положительным, так и отрицательным. Положительное значение соответствует выдаче мощности (разряд), отрицательное – потреблению мощности (заряд).

При реализации алгоритма в модели в MATLAB сигнал [В] в качестве возмущающего воздействия подается на блок СНЭ (рисунок 6.6). Далее, как показано на рисунках 6.7 и 6.8, формируется управляющее воздействие $P_{СНЭ}$.

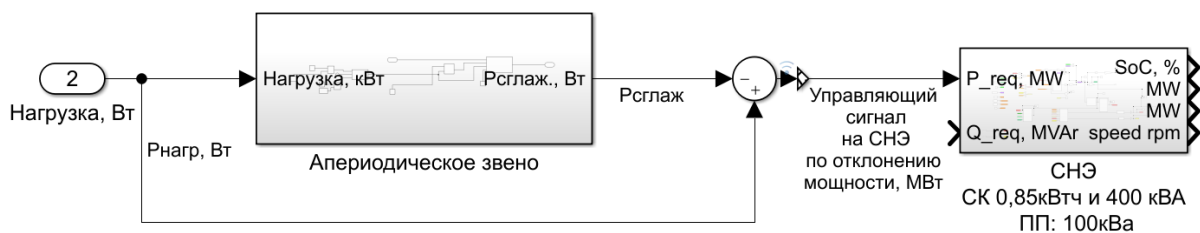


Рисунок 6.8 – Структурная схема алгоритма №1 в ПВК MATLAB/Simulink

На рисунке 6.9 представлены осциллограммы, полученные до и после применения алгоритма управления № 1 с постоянной времени апериодического звена $T_{АПЕР} = 1$ с (выбрано опытным путем из серии расчетных экспериментов).

Выбор значения постоянной времени $T_{АПЕР}$ зависит от параметров генераторных агрегатов и требований эксплуатирующих организаций [57,58].

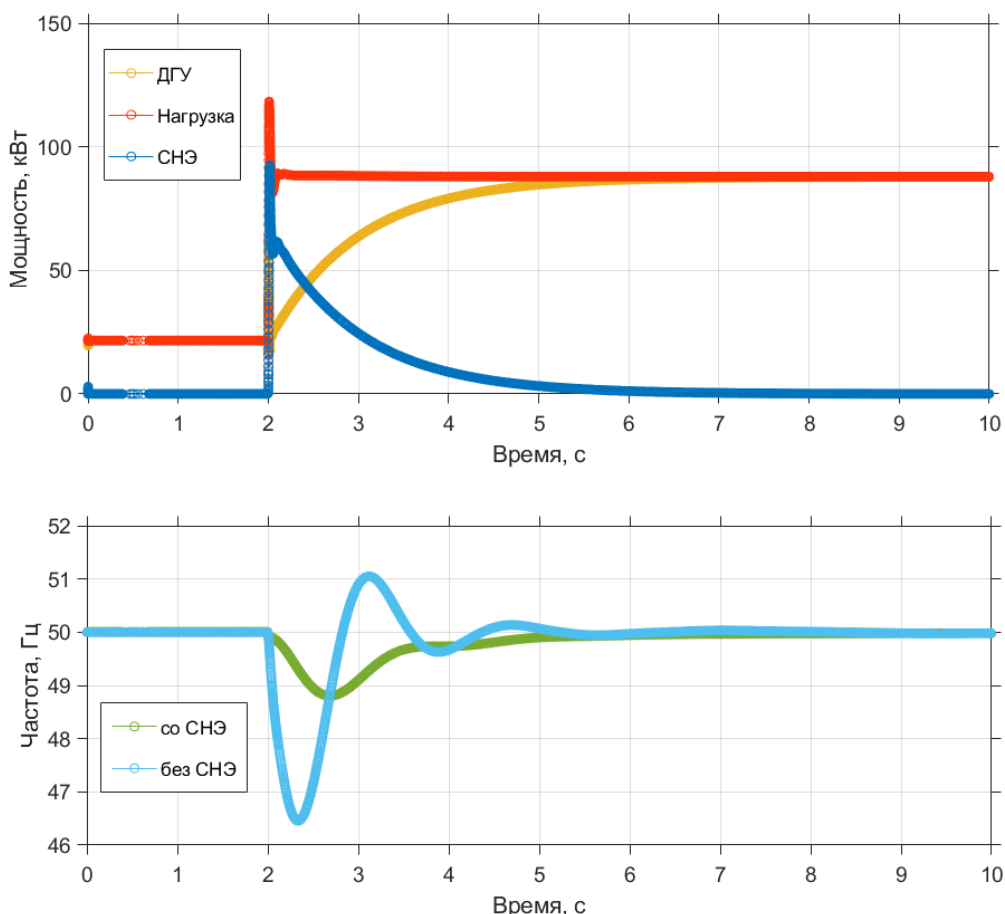


Рисунок 6.9 – Осциллограммы мощности ДГУ, нагрузки, СНЭ и частоты сети при постоянной времени апериодического звена $T_{АПЕР} = 1$ с (с участием и без участия СНЭ в регулировании) при набросе нагрузки с 21,6 кВт до 89 кВт

Как видно из серии расчетных экспериментов (рисунок 6.10), чем выше постоянная времени апериодического звена, тем меньше максимальное отклонение частоты при набросе нагрузки. При этом стоит учитывать то, что увеличение постоянной времени ведет к большему времени переходного процесса, то есть будет увеличиваться время от наброса нагрузки до полного восстановления частоты до 50 Гц с допустимой погрешностью

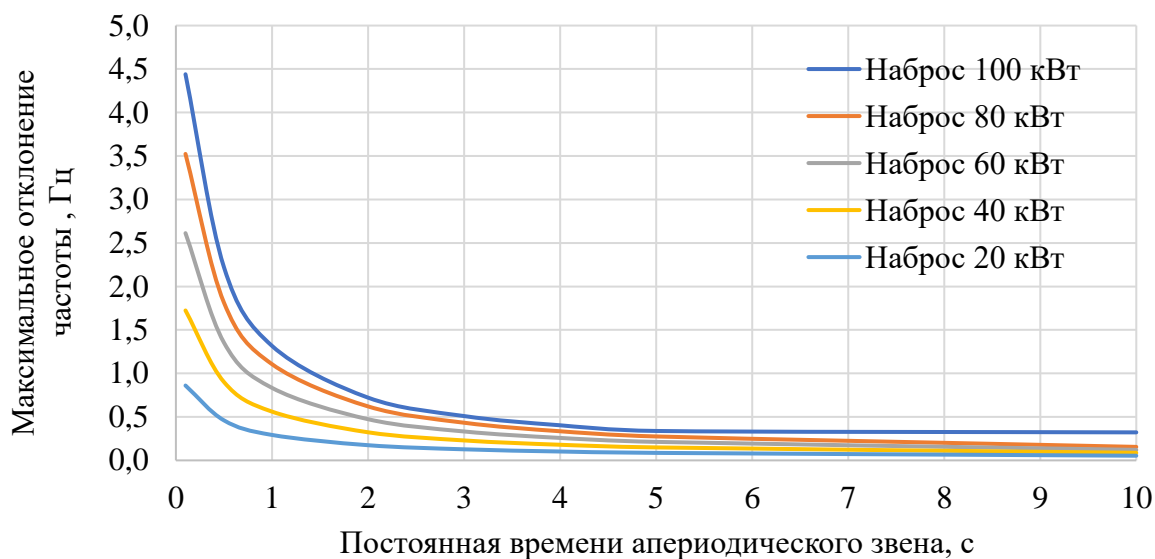


Рисунок 6.10 – Зависимости максимального отклонения частоты от постоянной времени апериодического звена алгоритма №1 при набросе нагрузки от 20 до 100 % мощности генератора с холостого хода

Вывод: применение алгоритма № 1 управления СНЭ для регулирования частоты в автономной энергосистеме путем сглаживания набросов/сбросов нагрузки уменьшило отклонение частоты с 3,8 Гц до 1,1 Гц при набросе 67,4 кВт нагрузки. Выбор значения постоянной времени апериодического звена сводится к нахождению желаемого соотношения между максимальным отклонением частоты и временем переходного процесса.

Алгоритм № 2 управления СНЭ для регулирования частоты в автономной энергосистеме построен по принципу ПД-регулирования. Структурная схема регулятора представлена на рисунке 6.11. Такой подход носит специальное название в зарубежных источниках: виртуальная инерция СНЭ [51-54].

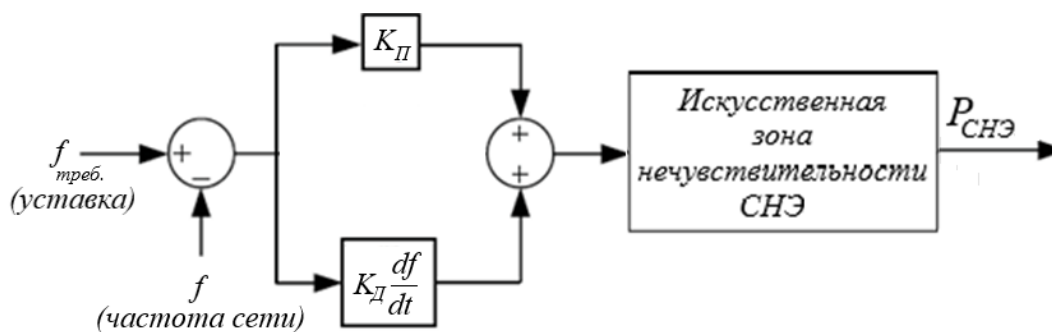


Рисунок 6.11 – Структурная схема алгоритма управления №2

На модели, изображенной на рисунке 6.6, сигнал частоты [А] – регулируемая величина, подаётся в блок СНЭ. Далее, как показано на рисунках 6.11 и 6.12, формируется управляющее воздействие $P_{СНЭ}$.

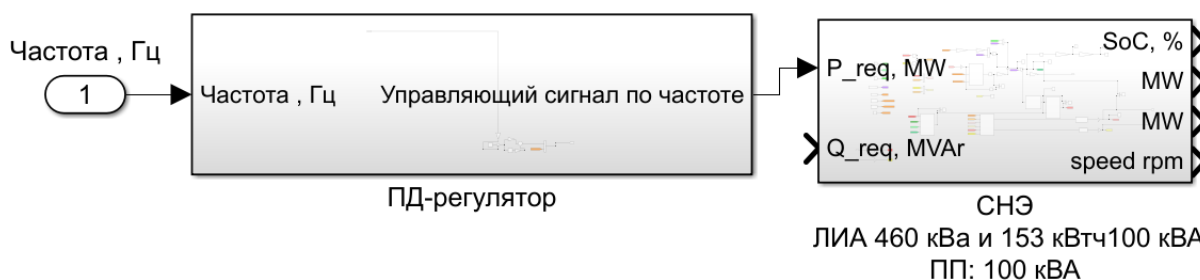


Рисунок 6.12 – Структурная схема алгоритма №2 в ПВК MATLAB/Simulink

В результате получены осциллограммы до и после применения алгоритма управления № 2 (рисунок 6.12) с параметрами $K_P = 100$ $K_D = 50$ (выбраны опытным путем из серии расчетных экспериментов).

Вывод: применение алгоритма управления № 2 с помощью ПД-регулирования уменьшило отклонение частоты с 3,8 Гц до 0,5 Гц при набросе 67,4 кВт нагрузки в автономной энергосистеме.

На основании расчетов по алгоритмам № 1 и № 2 можно сделать вывод, что для регулирования частоты с задействованием быстродействующего накопителя энергии (например, суперконденсатора – СК) целесообразно использовать алгоритм № 1, т. к. в первый момент наброса он способен незамедлительно выдать управляющее воздействие. Для регулирования частоты по её отклонению с использованием алгоритма № 2

подходит накопитель энергии с меньшим быстродействием и меньшим ресурсом циклов заряда-разряда (например, литий-ионный аккумулятор – ЛИА).

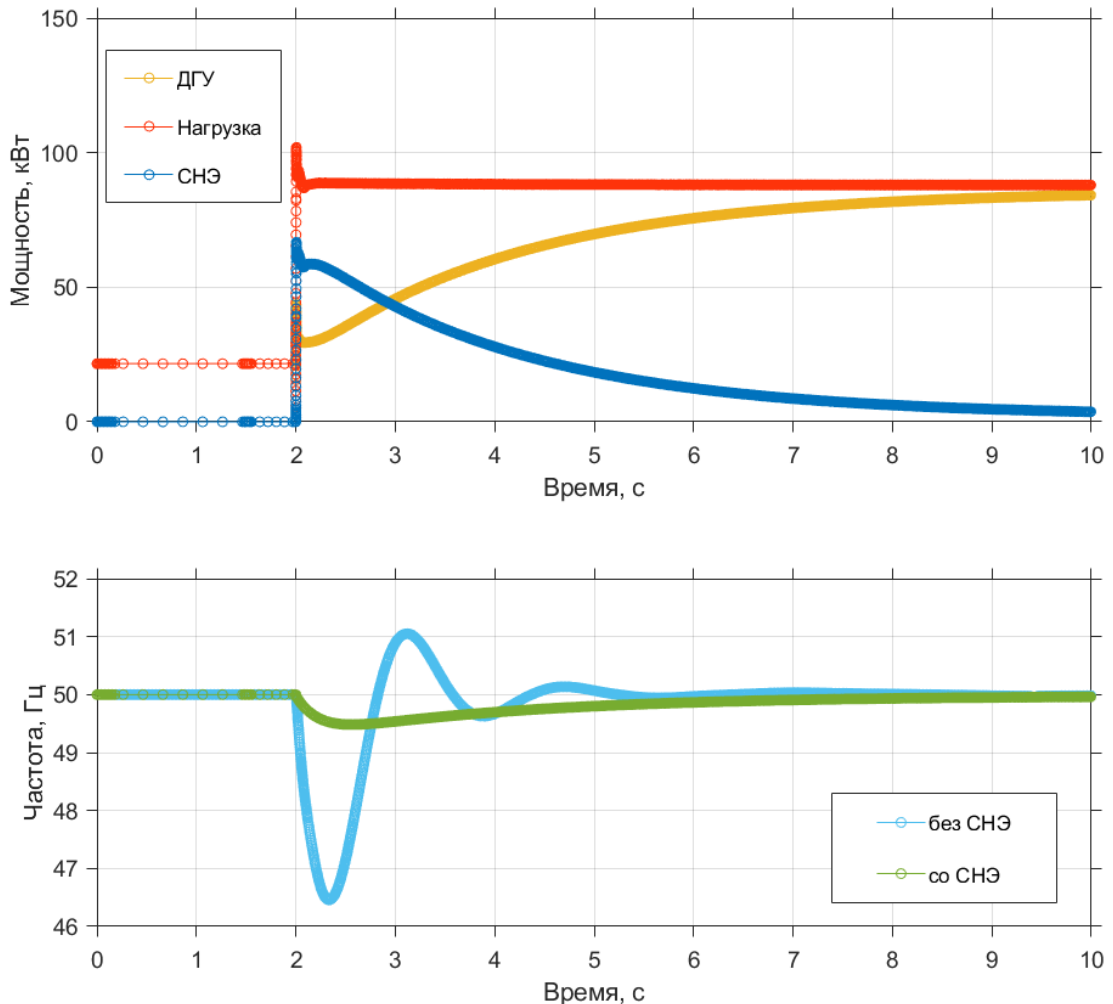


Рисунок 6.12 - Осциллограммы мощности ДГУ, нагрузки, СНЭ и частоты сети с применением алгоритма №2 ($K_{П} = 100$, $K_{Д} = 50$) со СНЭ и без нее при набросе нагрузки с 21,6 кВт до 89 кВт

Пример комбинации обоих алгоритмов в составе гибридной СНЭ, включающей в свой состав СК и ЛИА, показан на рисунке 6.13. Расчет показывает, что комбинация двух алгоритмов управления приводит к отклонению частоты 0,21 Гц при набросе 67,4 кВт нагрузки, что на 0,6 % относительно номинальной частоты, чем при использовании алгоритмов в отдельности.

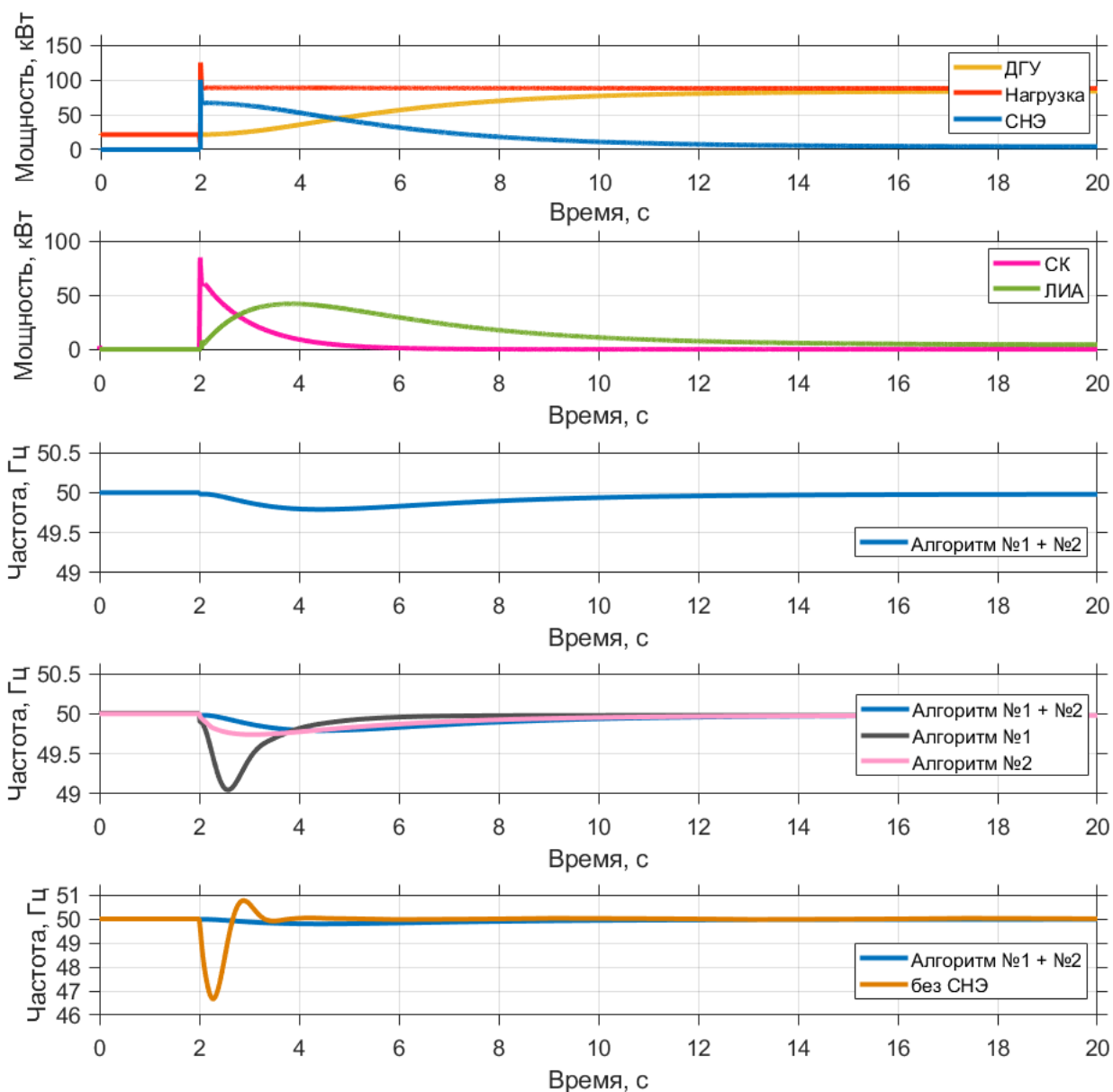


Рисунок 6.13 – Осциллограммы мощности ДГУ, нагрузки, СНЭ и частоты сети с применением алгоритма №1 (для СК, $T_{АПЕР}=1$ с) и №2 (для ЛИА, $K_{П} = 100$, $K_{Д} = 50$) со СНЭ и без нее при набросе нагрузки с 21,6 кВт до 89 кВт

Таким образом, разработаны два алгоритма управления СНЭ для регулирования частоты: алгоритм, отслеживающий и сглаживающий резкие изменения мощность нагрузки, и алгоритм на основе ПД-регулятора по частоте. Опробована комбинация алгоритмов в гибридной СНЭ на базе ЛИА и СК.

6.2 Примеры расчета переходных процессов в автономной энергосистеме с возобновляемыми источниками энергии

Интеграция различных ВИЭ с традиционными источниками энергии (ДГУ, ГПУ и ГТУ) в автономных энергосистемах создает проблему стабильности частоты напряжения. Разработанная математическая модель автономной энергосистемы позволяет провести расчеты переходных процессов, когда частота сети изменяется за счет непостоянства генерации СЭС во времени (рисунок 6.14).

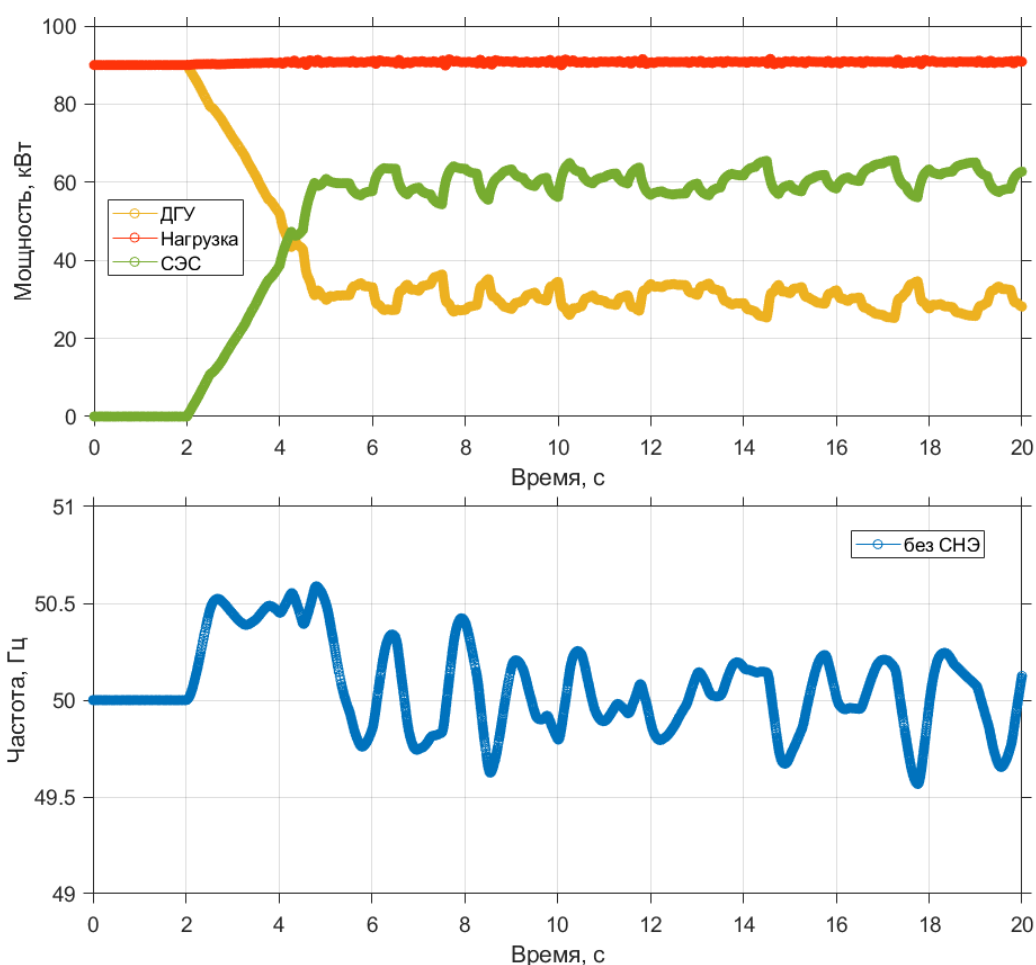


Рисунок 6.14 - Осциллограммы мощности ДГУ, нагрузки, СЭС и частоты сети без СНЭ при базовой нагрузке 90 кВт

Регулирование частоты в этом случае происходит только с помощью штатного АРС ДГУ. Изменение выработки СЭС моделировалось путем смены уровня инсоляции, которая может возникать из-за облаков. Как видно

из рисунка 6.14, непостоянство выработки СЭС негативно влияет на уровень частоты сети, колебания которой достигают до 1 Гц.

При включении СНЭ в математическую модель с алгоритмом управления №2 (ПД-регулирование) получаем следующие осциллограммы (рисунок 6.15). Как видно из рисунка 6.15, СНЭ эффективно регулирует частоту, которая изменяется плавно, без резких скачков. На 2 секунде расчета ДГУ плавно передает свою мощность СЭС, выработка которой увеличилась за счет роста инсоляции. Далее, АРС ДГУ не реагирует на изменение мощности вырабатываемой солнечными панелями.

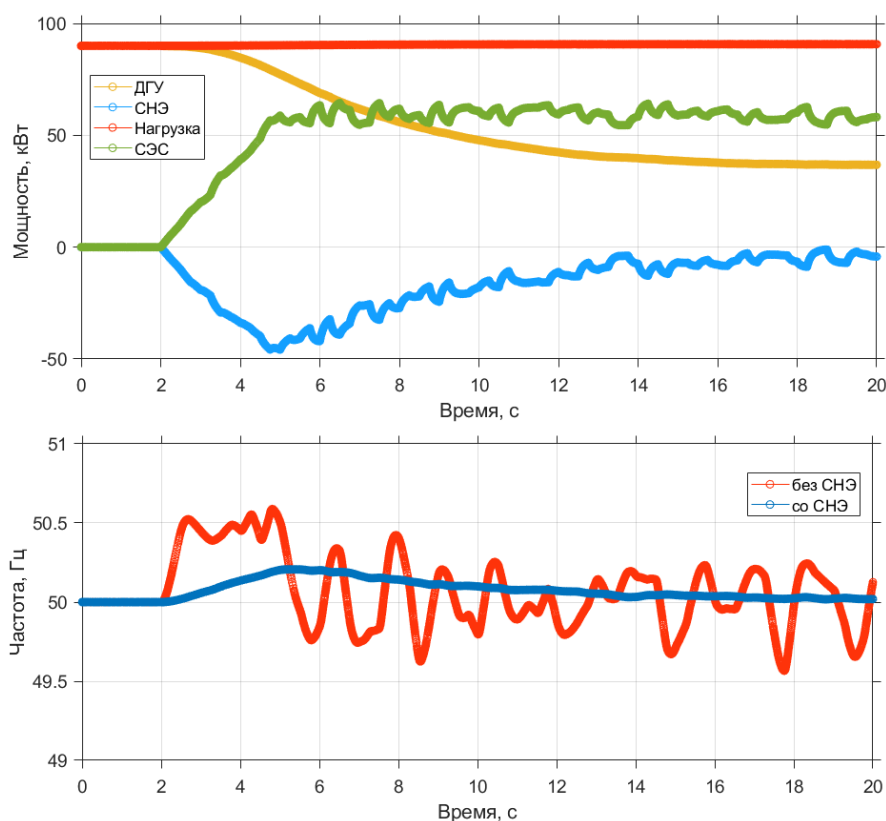


Рисунок 6.15 - Осциллограммы мощности ДГУ, нагрузки, СЭС, СНЭ и частоты сети при базовой нагрузке 90 кВт

Таким образом, привлечение к управлению частотой и активной мощностью быстродействующих СНЭ является перспективным направлением их использования в энергосистемах любых типов. СНЭ способны предотвратить отклонения частоты при резких изменениях нагрузки или генерации.

7 ОЦЕНКА КОММЕРЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ЗА СЧЕТ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В основной части диссертации были рассмотрены вопросы по модернизации автономной энергосистемы путем включения в ее состав систем накопления энергии. Экономическое обоснование представляет собой оценку коммерческой эффективности модернизации системы электроснабжения.

Основная проблема ДГУ— это высокий расход топлива при неполной загрузке, особенно при длительной эксплуатации в таком режиме. В энергосистемах с резко переменным характером нагрузки генераторные агрегаты (ГА) работают в неэкономичных режимах. Это связано с тем, что установленная мощность ДГУ выбирается по максимальному значению нагрузки, в то время как среднее значение мощности нагрузки не превышает 20–25%. Это приводит к завышению установленной мощности генераторных агрегатов по отношению к средней мощности нагрузки в 3–4 раза и, соответственно, к существенному увеличению удельного расхода топлива. Другая проблема таких генераторов заключается в образовании сажи в двигателе при эксплуатации оборудования на неполной загрузке, что приводит к преждевременной необратимой поломке двигателя.

Резко переменный характер нагрузочной диаграммы автономной электростанции (рисунок 7.1) обусловлен работой подъемно-транспортных механизмов циклического действия, электродуговых плавильных печей, предприятий нефтегазовой отрасли (станки-качалки), машиностроения и металлургии (кузнечно-штамповочные машины). При такой нагрузке обеспечение режимных параметров возможно не всеми видами станций. Например, газопоршневые агрегаты неспособны выдержать такие резкие наборы и сбросы нагрузки [21].

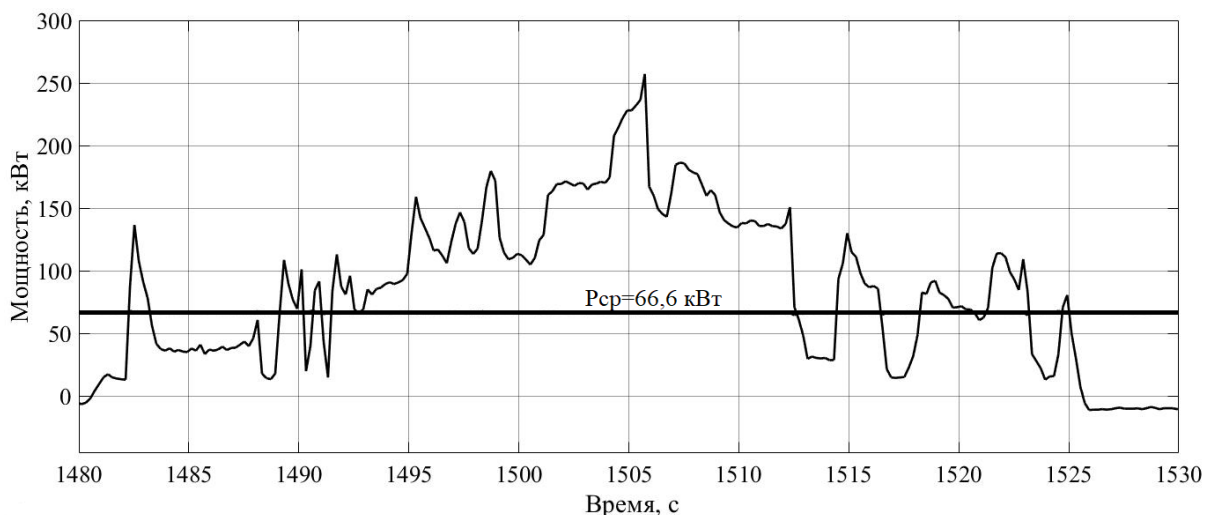


Рисунок 7.1 – График изменения мощности нагрузки за 1 характерный цикл работы

Работа энергосистемы в таком режиме характеризуется значительным увеличением удельного расхода топлива (на 45% относительно номинального режима) и уменьшением моторесурса дизельного двигателя (рисунок 7.2) [22].

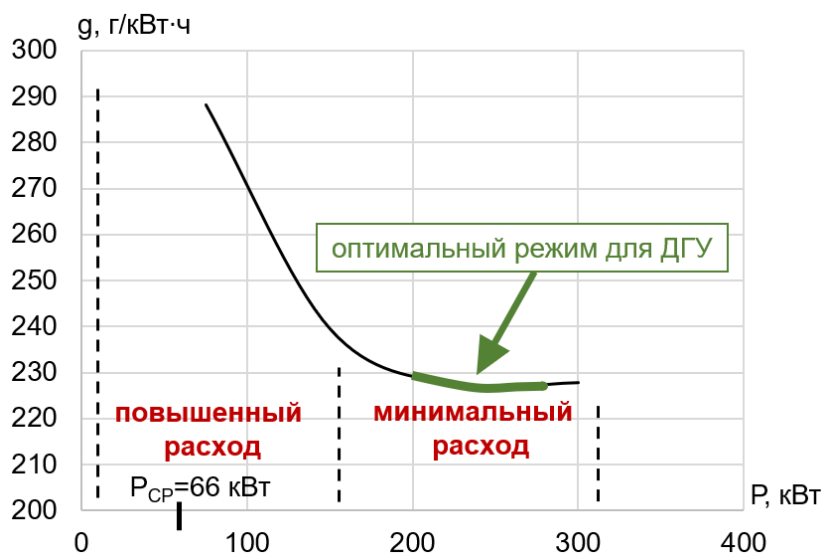


Рисунок 7.2 – Удельный расход топлива ДГУ мощностью 300 кВт

СНЭ позволяет повысить технико-экономическую эффективность ДГУ за счет сглаживания графика нагрузки (рисунок 7.3).

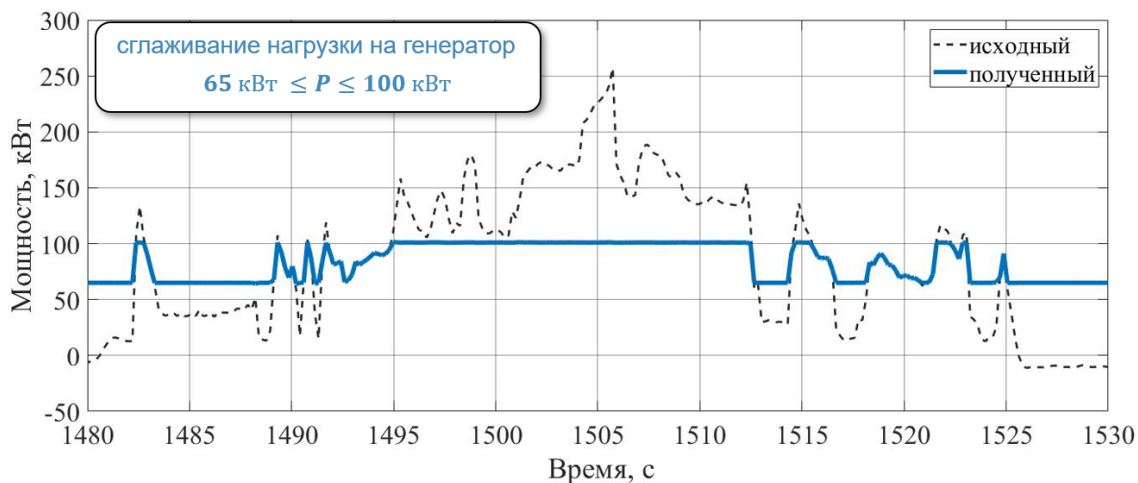


Рисунок 7.3 – График нагрузки без накопителя энергии (пунктирная линия) и с накопителем энергии (сплошная линия)

ДГУ при совместной работе со СНЭ будет работать в более экономичном режиме с меньшим удельным расходом топлива. К тому же можно заменить «штатный» генераторный агрегат мощностью 300 кВт на агрегат мощностью 100 кВт близкой к среднему значению нагрузочной диаграммы (рисунок 7.4).

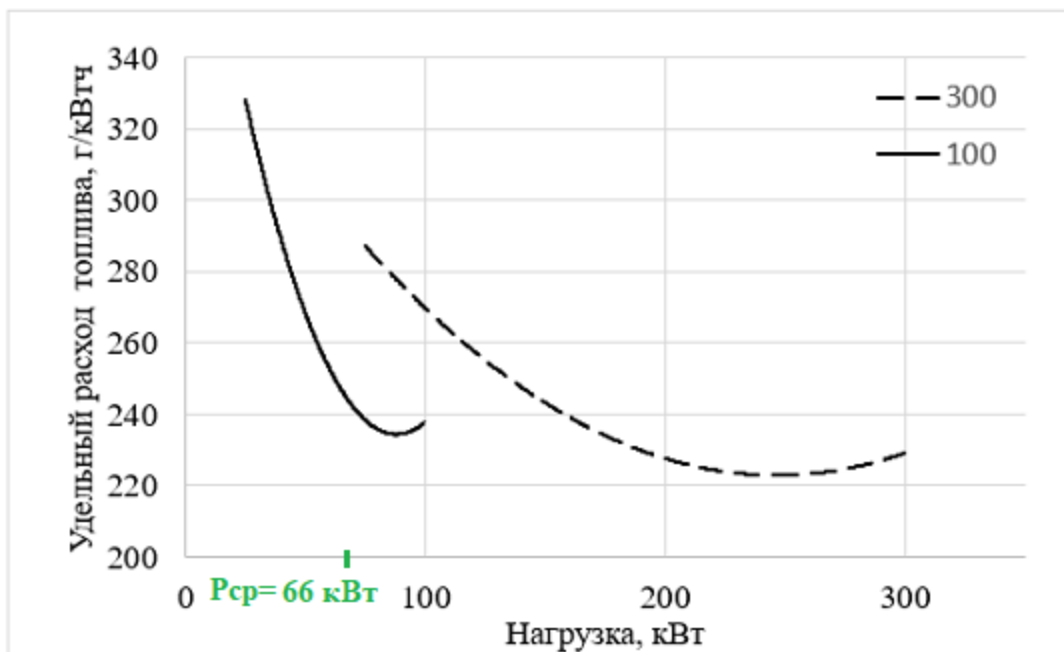


Рисунок 7.4– Сравнение удельного расхода топлива ДГУ мощностью 100 и 300 кВт

При этом достигается комплексный эффект: минимальный удельный расход топлива, минимальная стоимость агрегата, минимальные издержки на его обслуживание, увеличение моторесурса приводного двигателя, снижение потерь в генераторе от переходных процессов, обусловленных резко переменной нагрузкой. Данный метод оптимизации состава генерирующего оборудования наиболее актуален для технологически изолированных энергосистем, где мощность нагрузки соизмерима с мощностью генераторов.

7.1 Оценка стоимости установки и эксплуатационных затрат

Для покрытия нагрузки автономной энергосистемы и обеспечения надёжности требуется ДГУ, обеспечивающая покрытие нагрузки (300 кВт). Дополнительный дизель-генератор должен постоянно находиться в горячем резерве для обеспечения надежности, что приводит к дополнительным топливным затратам. Ниже приведем сравнение двух вариантов:

-ДГУ мощностью 300 кВт

-ДГУ мощностью 100 кВт и СНЭ мощностью 200 кВт и энергоемкостью 50 кВт·ч.

Стоимость установки СНЭ будет определяться на основе данных о стоимости установки подобных устройств из расчета 300 \$ за 1 кВт мощности и 300 \$ за 1 кВт·ч энергоемкости накопителя энергии на базе литий-ионных батарей:

$$C_{\text{НЭ}} = 300 \cdot P_{\text{НЭ}} + 650 \cdot W_{\text{НЭ}}$$

При курсе доллара в 75 рублей получаем:

$$C_{\text{НЭ}} = 75 \cdot (300 \cdot 200 + 300 \cdot 50) = 5625 \text{ тыс. руб.}$$

Стоимость ДГУ 100 кВт:

$$C_{\text{ДГУ}100} = 1000 \text{ тыс. руб.}$$

Стоимость ДГУ 300 кВт:

$$C_{\text{ДГУ}300} = 2000 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на оборудование по первому варианту:

$$C_{T1} = C_{ДГУ300} = 2000 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на оборудование по второму варианту:

$$C_{T2} = C_{ДГУ100} + C_{НЭ} = 1000 + 5625 = 6625 \text{ тыс. руб.}$$

Эксплуатационные затраты на обслуживание оборудования будут определяться по основным экономическим элементам:

1. материальные затраты (I_{MR});
2. затраты на оплату труда ($I_{ФОР}$);
3. амортизация основных фондов (I_{AM});
4. прочие затраты ($I_{ПР}$).

Прочие затраты включают в себя затраты на ремонт и другие статьи затрат.

Величина ремонтных затрат для СНЭ:

$$I_{РФ} = \frac{H_{РФ}\%}{100} \cdot C_{НЭ} = \frac{0,5}{100} \cdot 5625 = 28,1 \text{ тыс. руб./год}$$

$H_{РФ}$ примем 0,5% для СНЭ и 1,5 % для ДГУ.

Величина затрат на оплату труда:

$$I_{ФОР} = \frac{H_{ФОР}\%}{100} \cdot C_{НЭ} = \frac{0,6}{100} \cdot 5625 = 33,8 \text{ тыс. руб./год}$$

Величина прочих затрат составляет:

$$I_{ПР} = I_{РФ} + I_{ФОР} = 28,1 + 33,8 = 61,9 \text{ тыс. руб./год}$$

Ежегодные амортизационные отчисления составляют:

$$I_{AM} = \frac{H_{AM}\%}{100} \cdot C_{OF} = \frac{6}{100} \cdot 5625 = 337,5 \text{ тыс. руб./год}$$

Материальные затраты:

$$I_{MR} = \frac{H_{MR}\%}{100} \cdot (I_{ПР} + I_{AM}) = \frac{4}{100} \cdot (61,9 + 337,5) = 16 \text{ тыс. руб./год}$$

H_{MR} примем 4% для СНЭ и 7 % для ДГУ.

Расчет эксплуатационных затрат для ДГУ мощностью 100 и 300 кВт производится аналогично. Результаты расчета сведены в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Капитальные и эксплуатационные затраты

Расчет эксплуатационных затрат			
	1 вариант	2 вариант	
	ДГУ 300	ДГУ 100	СНЭ
Капитальные затраты (стоимость оборудования), тыс.руб.	2000	1000	5625
Ремонтные, тыс.руб.	30,0	15,0	28,1
Фонд оплаты труда, тыс.руб.	12,0	6,0	33,8
Прочие затраты, тыс.руб.	42,0	21,0	61,9
Амортизация, тыс.руб.	120,0	60,0	337,5
Материальные затраты, тыс.руб.	11,3	5,7	16,0
Итого эксплуатационных затрат, тыс.руб.	173,3	86,7	415,4
Итого эксплуатационных затрат по варианту, тыс.руб.	173,3	502	

7.2 Оценка доходов после оптимизации состава генерирующего оборудования

Доход от экономии топлива при замене ДГУ 300 кВт на ДГУ 100 кВт рассчитывается, исходя из числа часов работы в год T , а также цены за 1 литр дизельного топлива Ц . Принимаем число часов работы в год $T=4000$ ч, цену дизельного топлива $\text{Ц}=70$ руб./л, расход топлива ДГУ мощностью 300 кВт при нагрузке 66,6 кВт составляет 25,76 л/ч, а расход ДГУ мощностью 100 кВт – 19,78 л/ч.

$$D_{\text{топл}} = (G_{\text{дгу300}} - G_{\text{дгу100}}) \cdot T \cdot \text{Ц} = (25,76 - 19,78) \cdot 4000 \cdot 70 = 1673,84 \text{ тыс. руб./год}$$

Учитывая эксплуатационные затраты по каждому варианту, получаем суммарный доход:

$$D = D_{\text{топл}} - (I_{\text{эксп2}} - I_{\text{эксп1}}) = 1673,84 - (502 - 173,3) = 1345 \text{ тыс. руб.}$$

Также, в первый год получаем доход от экономии капитальных затрат на генерирующее оборудование:

$$D_{\text{кап}} = C_{\text{дгу300}} - C_{\text{дгу100}} = 2000 - 1000 = 1000 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 7.2 - Исходные данные для анализа доходности проекта

Показатель		Единица измерения	Значение
Затраты на оборудование и монтаж		тыс. руб.	6625
Срок службы		лет	20
Дополнительный доход после установки НЭ		тыс. руб.	1345
Издержки на эксплуатацию	амортизация	тыс. руб.	397,5
	прочие затраты	тыс. руб.	82,9
	материальные затраты	тыс. руб.	21,6
Ставки дисконтирования		%	12
			8

Проведем расчет чистого дисконтированного дохода по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=0}^T \frac{D_i - K_i}{(1 + E)^i}$$

где T – расчетный период; D_i - чистый доход в году i; K_i - капиталовложения за год i.

Результаты расчетов по определению чистого дисконтированного дохода (в тыс. руб.) для ставок дисконтирования 12% и 8% представлены в таблицах 7.3 и 7.4.

Таблица 7.3 – Расчет срока окупаемости при ставке дисконтирования 12%

Год	К	И _{АМ}	И _{МР}	И _{ПР}	D	(1+E) ⁿ	ЧДД в год	ЧДД с нарастающим итогом
1	6625	397,5	21,6	82,9	2345,2	1,1	-3962,8	-3962,8
2		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,2	1153,3	-2809,6
3		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,3	1067,8	-1741,7
4		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,4	988,7	-753,0
5		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,5	915,5	162,5
6		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,6	847,7	1010,2
7		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,7	784,9	1795,1
8		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,9	726,7	2521,8
9		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,0	672,9	3194,7
10		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,2	623,1	3817,8
11		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,3	576,9	4394,7
12		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,5	534,2	4928,9
13		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,7	494,6	5423,5
14		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,9	458,0	5881,5

Продолжение таблицы 7.3

Год	К	ИАМ	ИМР	ИПР	D	(1+E) ⁿ	ЧДД в год	ЧДД с нарастающим итогом
15		397,5	21,6	82,9	1345,2	3,2	424,1	6305,5
16		397,5	21,6	82,9	1345,2	3,4	392,6	6698,2
17		397,5	21,6	82,9	1345,2	3,7	363,6	7061,7
18		397,5	21,6	82,9	1345,2	4,0	336,6	7398,4
19		397,5	21,6	82,9	1345,2	4,3	311,7	7710,0
20		397,5	21,6	82,9	1345,2	4,7	288,6	7998,6

Таблица 7.4 – Расчет срока окупаемости при ставке дисконтирования 8%

Год	К	И _{АМ}	И _{МР}	И _{ПР}	D	(1+E) ⁿ	ЧДД в год	ЧДД с нарастающим итогом
1	6625	397,5	21,6	82,9	2345,2	1,1	-3821,3	-3821,3
2		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,3	1072,4	-2748,9
3		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,4	957,5	-1791,5
4		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,6	854,9	-936,6
5		397,5	21,6	82,9	1345,2	1,8	763,3	-173,3
6		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,0	681,5	508,2
7		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,2	608,5	1116,7
8		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,5	543,3	1659,9
9		397,5	21,6	82,9	1345,2	2,8	485,1	2145,0
10		397,5	21,6	82,9	1345,2	3,1	433,1	2578,1
11		397,5	21,6	82,9	1345,2	3,5	386,7	2964,8
12		397,5	21,6	82,9	1345,2	3,9	345,3	3310,1
13		397,5	21,6	82,9	1345,2	4,4	308,3	3618,4
14		397,5	21,6	82,9	1345,2	4,9	275,2	3893,6
15		397,5	21,6	82,9	1345,2	5,5	245,8	4139,4
16		397,5	21,6	82,9	1345,2	6,1	219,4	4358,8
17		397,5	21,6	82,9	1345,2	6,9	195,9	4554,7
18		397,5	21,6	82,9	1345,2	7,7	174,9	4729,6
19		397,5	21,6	82,9	1345,2	8,6	156,2	4885,8
20		397,5	21,6	82,9	1345,2	9,6	139,4	5025,3

Срок окупаемости проекта составит примерно 5 лет.

Таким образом, для рассматриваемой автономной энергосистемы со средней мощностью нагрузки 66,6 кВт ($K_{иум}=22\%$) проведен экономический расчет целесообразности замены (на стадии проектирования) ДГУ мощностью 300 кВт на ДГУ мощностью 100 кВт. Для осуществления замены текущего ДГУ на агрегат меньшей мощности автономную энергосистему необходимо дополнить системой накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторных батарей мощностью 200 кВт и энергоемкостью 50 кВт·ч.

При этом достигается комплексный эффект: минимальный удельный расход топлива, минимальная стоимость агрегата, минимальные издержки на его обслуживание, увеличение моторесурса приводного двигателя, снижение потерь в генераторе от переходных процессов, обусловленных резко переменной нагрузкой.

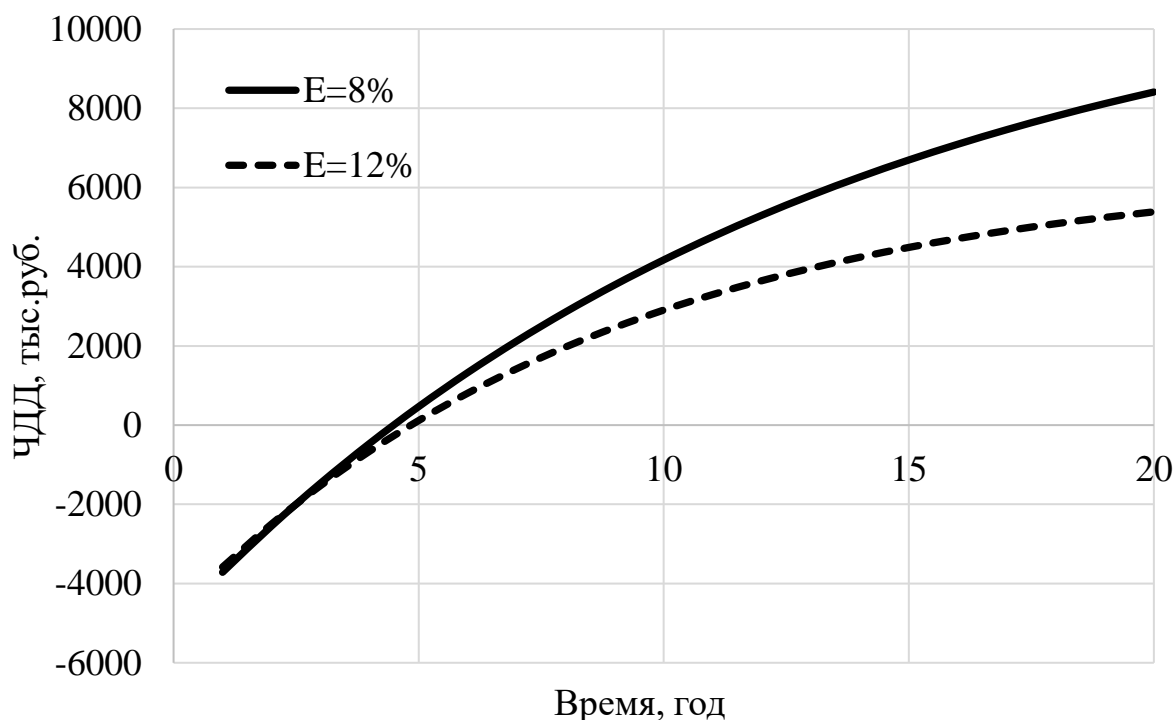


Рисунок 7.5 – Графическая интерпретация срока окупаемости при разных ставках дисконтирования

Срок окупаемости системы накопления энергии для рассматриваемого проекта должен составить примерно 5 лет, что говорит о том, что использование СНЭ в данном проекте целесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью и задачами исследования в диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель в ППК MATLAB/Simulink автономной электростанции на базе дизельной и солнечной генерации, имеющей в своем составе гибридную систему накопления энергии, поддерживающую требуемый уровень частоты сети в автоматическом режиме. Верификация математических моделей ДГУ и СНЭ проведена путем сравнения расчетов с натурными испытаниями.
2. Разработаны два алгоритма управления гибридной СНЭ для регулирования частоты сети. Для регулирования частоты с задействованием быстродействующего накопителя энергии с большим количеством циклов заряда-разряда (например, суперконденсатора – СК) целесообразно использовать алгоритм управления для сглаживания резко переменной нагрузки, т. к. в первый момент наброса/сброса он способен незамедлительно выдать управляющее воздействие. Для регулирования частоты по её отклонению с использованием второго алгоритма (ПД-регулятор) подходит накопитель энергии с меньшим ресурсом циклов заряда-разряда (например, литий-ионный аккумулятор – ЛИА).
3. Проведен анализ эффективности разработанных алгоритмов управления СНЭ, путем сравнения максимального отклонения частоты при набросе нагрузки до и после их применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Nadeem F., Hussain, S. M. S., Tiwari P. K., Goswami, A. K., Ustun, T. S. Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems. *IEEE Access* 2019, 7, 4555–4585.
2. Бердников Р. Н., Фортвов В. Е., Шакарян Ю. Г., Деньщиков К. К. Гибридный накопитель энергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // *Энергия единой сети*. – 2013. -N 1. – С.40-51.
3. Zobaа A. F. Energy storage technologies and applications. Rijeka, Croatia: Intech, 2013., – 328 pp.
4. Кононенко В. Ю., Вещунов О. В., Билашенко В. П., Смоленцев Д. О. Эффекты применения накопителей энергии в изолированных энергосистемах России / // *Арктика: экология и экономика*. – 2014. - N 2 (14). – С.61–66.
5. UN Environment and International Energy Agency: Towards a zeroemission, efficient, and resilient buildings and construction sector. *Global Status Report 2017*
6. Hossain E., Faruque H. M. R., Sunny M. S. H., Mohammad N., Nawar N. A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects. *Energies* 2020, 13, 3651. <https://doi.org/10.3390/en13143651>
7. Chen H., Cong T. N., Yang W., Tan, C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Prog. Nat. Sci.* 2009, 19, 291–312.
8. Экспертно-аналитический отчет “Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры” Энерджинет [Электронный ресурс]. -2019. -URL: <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/1b8/1b83729ddd27beaeb629e380293a4585.pdf> (дата обращения 18.04.2021).

9. Илюшин П. В., Куликов А. Л., Березовский П. К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты// Релейная защита и автоматизация. - 2019. - N 4. - С. 32–39.
10. Зырянов В. М., Кучак С. В., Бачурин П. А., Харитонов С. А., Метальников Д. Г., Гармаш Т. Г., Ворошилов А. Н., Фролов Д. А. Экспериментальные исследования и испытания совместной работы системы накопления энергии и ДГУ в составе автономной энергосистемы // Промышленная энергетика. - 2018. - N 10. - С.2–10
11. Бачурин П. А., Гладков Д. С., Зырянов В. М., Кучак С. В., Нестеренко Г. Б., Лебедев Д.Е., Решетников А.Н., Савицкий А.М. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы // Электроэнергия. Передача и распределение, 2020, N 2 (59). С. 18–24
12. Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии Министерство энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс]: <https://minenergo.gov.ru/node/9029> (дата обращения 18.04.2021).
13. Чаусов И. С., Бурдин И. А., Ряпин И. Ю., и др. «Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития» (под ред. Удальцова Ю. А., Холкина Д. В., Центр стратегических разработок, 2018).
14. ГОСТ Р 58092.1–2018. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения. Введен 01.03.2019. М.: Стандартинформ, 2018. 54 с.
15. Hossain E., Faruque H.M.R., Sunny M.S.H., Mohammad N., Nawar N. A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions,

- Policies, and Future Prospects. *Energies* 2020, 13, 3651.
<https://doi.org/10.3390/en13143651>
16. Breeze, P. Power System Energy Storage Technologies. In *Power Generation Technologies*; Elsevier, Amsterdam, Netherlands: 2019; pp. 219–249
17. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2017. 2017. Available online: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/05/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf> (дата обращения 13.05.2021).
18. Pedro J. Corral-Vega, Luis M. Fernandez-Ramirez, Pablo Garcia-Trivino, Hybrid powertrain, energy management system and techno-economic assessment of rubber tyre gantry crane powered by diesel-electric generator and supercapacitor energy storage system, *Journal of Power Sources*, Volume 412, 2019, Pages 311-320, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.027>.
19. РСДН.560150.001 РЭ. Руководство по эксплуатации. Система накопления энергии низкого напряжения СНЭ-НН. ООО «Системы накопления энергии» — Введ. 19.04.2018. — 70 с.
20. Bloomberg New Energy Outlook 2020 [Электронный ресурс]. -2020. - URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (дата обращения 13.05.2021).
21. Кальм Н. А., Николаева Е. А., Беляев А. Н. Управление газопоршневыми агрегатами в условиях резкопеременной нагрузки электроэнергетической системы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. №1(190). С.45–52.
22. Четвергов В. А. Влияние переходных процессов на расход топлива дизелем в эксплуатации / В. А. Четвергов, С. М. Овчаренко, П. С. Корнеев // Известия Транссиба / Омский гос. Ун-т путей сообщения. Омск, 2012. №1. С. 27–32.

23. Форсайт П., Шамис М. А., Иванов Ф. А. Аппаратная платформа NovaCог для симуляторов RTDS // Энергия единой сети, 2018, N3(38). С.20 – 24.
24. TSAT-RTDS Interface [Электронный ресурс]. -URL: https://www.dsatools.com/wpcontent/uploads/2020/01/TRI_brochure.pdf (дата обращения 13.05.2021).
25. Газовый двигатель TCG 2020 [Электронный ресурс]. -URL: <https://www.mwm.com.ru/gazovye-dvigateli-blochnye-tehc/gazovye-dvigateli-generatornyye-ustanovki/tcg-2020/> (дата обращения 13.05.2021).
26. Техническая карта GBS-LFP100AH [Электронный ресурс]. URL: <https://prometheusenergy.ru/product/litij-ionnyj-akkumulyator-gbs-lfp100ah-a/>
27. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes // IEE Press, John Wiley and Sons Inc. 2007. – P. 389.
28. Dybko M. A. Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters / M. A. Dybko, S. V. Brovanov // 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): [proc.], Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – IEEE, 2015. – P. 415-421.
29. Ефремов Д. Г. Исследование возможности и разработка способов применения накопителей энергии различного типа для противоаварийного управления при больших возмущениях в энергосистеме: дис. ... канд. тех. наук.: 05.14.02 / Ефремов Дмитрий Геннадьевич. – М., 2018. – 146 с.
30. Marinescu C., Serban I. Analysis of frequency stability in a residential autonomous microgrid based on a wind turbine and a Microhydro power plant 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEMWA.2009.5208400.

- 31.Rezkallah M., Chandra A. and Singh B. Control of autonomous wind diesel battery hybrid power system, 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2012.6484316.
- 32.Takahashi R., Umemura A., Tamura J. An application of adjustable speed diesel power plant to frequency control of small scale power system with renewable energy sources, 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994410.
- 33.Naresh P., Sai Vinay Kishore N., Seshadri Sravan Kumar V., Mathematical modeling and stability analysis of an ultracapacitor based energy storage system considering non-idealities, Journal of Energy Storage, Volume 33, 2021, 102112, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102112>.
- 34.Chen S. X., Tseng K. J., Choi S. S. Modeling of lithium-ion battery for energy storage system simulation. 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. doi:10.1109/appeec.2009.4918501
- 35.Xu J., Lindbergh G., Varna J. Multiphysics modeling of mechanical and electrochemical phenomena in structural composites for energy storage: Single carbon fiber micro-battery. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 37(10), 701–715. doi:10.1177/0731684418760207
- 36.Hasan N. S., Hassan M. Y., Majid M. S., Rahman, H. A. Mathematical model of compressed air energy storage in smoothing 2MW wind turbine. 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference. doi:10.1109/peoco.2012.6230886
- 37.Cheng Z., Chen W., Li Q., Jiang Z., Yang, Z. Modeling and dynamic simulation of an efficient energy storage component - supercapacitor. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. doi:10.1109/appeec.2010.5449213

38. Argyrou M. C., Christodoulides P., Marouchos C. C., Kalogirou S. A. Hybrid battery-supercapacitor mathematical modeling for PV application using Matlab/Simulink. 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). doi:10.1109/upec.2018.8541933
39. Нестеренко Г. Б., Бачурин П. А., Гладков Д. С., Зырянов В. М. [и др.] Оценка точности математической модели системы накопления энергии по результатам натурального эксперимента на газопоршневой электростанции // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2020. - N 5 (62). - С. 58–63.
40. Кирьянова Н. Г., Бачурин П. А., Зырянов В. М., Кучак С. В., Метальников Д. Г., Нестеренко Г. Б., Потапенко А. М., Пранкевич Г. А. Математическая модель системы накопления энергии в составе энергосистемы // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы тр. 14 междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Т. 7. С. 228–234.
41. Армеев Д. В., Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Нестеренко Г. Б., Пранкевич Г. А. Моделирование энергосистем с накопителями энергии // Электропитание, 2018, № 2. С. 22–33.
42. Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Нестеренко Г. Б., Пранкевич Г. А. Универсальная математическая модель системы накопления электрической энергии // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф. Казань: Изд-во КГЭУ, 2018. Т. 3. С. 127–130.
43. Вагин Г. Я., Солнцев Е. Б., Мамонов А. М., Петров А. А. Математическая модель электроагрегата мини-ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2015, т. 326, № 8. С. 92–101.
44. Техническая карта ДЭС 100 кВт [Электронный ресурс]. -URL: <https://www.d-system.ru/news/38/> (дата обращения 14.05.2021).

- 45.ГОСТ 32144–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014–17 с.
- 46.Kokam’s 56 Megawatt Energy Storage Project Features World’s Largest Lithium NMC Energy Storage System for Frequency Regulation. - URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/kokams-56-megawatt-energy-storage-project-features-worlds-largest-lithium-nmc-energy-storage-system-for-frequency-regulation-300229219.html> (дата обращения 18.04.2021).
- 47.Vorobev P., Khamisov O., Chevalier S., Cohn E., Turitsyn K., and Mallada E., “Electric storage for optimal frequency control”
- 48.Jiang Y., Cohn E., Vorobev P., and Mallada E., "Dynamic droop approach for storage-based frequency control", arXiv preprint arXiv:1910.04954, 2019.
- 49.Oudalov A., Chartouni D. and Ohler C., "Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 3, pp. 1259-1266, Aug. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.901459.
- 50.Cui X., Li X., Zhang K., Wen Y., Meng Y. "An Optimized Control Model of Battery Energy Storage Systems for Primary Frequency Response," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 2019, pp. 3190-3193, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881191.
- 51.Li J., Xiong R., Yang Q., Liang F., Zhang M., and Yuan W., “Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system,” Applied Energy, vol. 201, pp. 257–269, 2017.

52. Arani A. K., Gharehpetian G., and Abedi M., "Review on energy storage systems control methods in microgrids," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 107, pp. 745–757, 2019.
53. Eto J. H., Undrill J., Roberts C., Mackin P., and Ellis J., "Frequency control requirements for reliable interconnection frequency response," 2018.
54. Toma L. et al., "On the virtual inertia provision by BESS in low inertia power systems," 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Limassol, Cyprus, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ENERGYCON.2018.8398755
55. Регулирование частоты в энергосистеме [Электронный ресурс]. - URL: <http://electricalschool.info/sety/1819-regulirovanie-chastoty-v-jenergositeme.html> (дата обращения 18.05.2021).
56. Влияние изменения частоты на работу электрических систем [Электронный ресурс]. - URL: <http://electricalschool.info/sety/1515-vlijanie-izmenenija-chastoty-na-rabotu.html> (дата обращения 18.05.2021).
57. Илюшин П. В. О свойствах энергоустановок с газопоршневыми двигателями *Электрические станции*. - 2009. - N 11. - С. 42–46.
58. Илюшин П. В. Анализ обоснованности уставок устройств РЗА генерирующих установок с двигателями внутреннего сгорания на объектах распределенной генерации // *Релейная защита и автоматизация*. - 2015. - N 3 (20). - С. 24–29.